MAI 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> Fremde Sexualhormone im Uterus

> Mathematik der Börsencrashs

> Geschichte der Gezeiten

> ESSAY: Missverständnisse

www.spektrum.de

SERIE: KOSMOLOGIE

Das beschleunigte Universum

TEIL I:
Die Symphonie der Schöpfung im Echo des Urknalls

NEUES VOM MARS

Die besten Fotos vom Roten Planeten

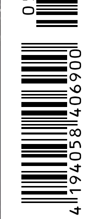
UMWELT

Quecksilber verschmutzt Pole

ARCHÄOLOGIE

Die Antike war vor allem bunt







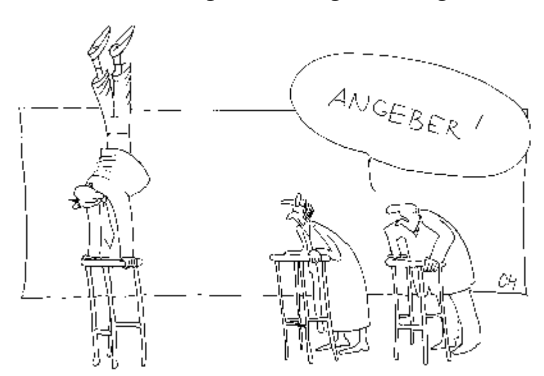
Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wirklich alt und krank?

Die Renten sind sicher!« Dies war schon vor Zeiten das hilflose Versprechen eines Bundesministers. Inzwischen sind wir auf der harten demografischen Realität aufgeschlagen: Durch die Umkehr der Alterspyramide wird es in absehbarer Zeit gar nicht mehr genügend Beitragszahler geben, und der Bundestag muss sich heute darum streiten, ob im Jahre 2030 die Renten bei 46 Prozent oder doch eher bei 43 Prozent landen werden.

Nicht weniger brennend als das Rentenproblem ist die Frage, in welchem Zustand wir unser Alter erleben werden. Alt werden wollen die allermeisten, aber nicht zugleich krank und gebrechlich. Die laufend ansteigende Lebenserwartung wird bestimmte Krankheitsphänomene massenhaft werden lassen: Immer mehr Menschen werden allein die »normalen« Begleitumstände des Alterns erleben, wie allgemein verlangsamte geistige und körperliche Funktionen, Verlust an Lernpotenzial, Vergesslichkeit, Muskelabbau, spröde Knochen, Vereinsamung oder Depressionen; hinzu können dann noch die typischen Alterserkrankungen wie Arthrose, Altersdiabetes, Parkinson oder Alzheimer-Demenz treten.

Die Zahlen sind dramatisch: Jenseits der 85 steigen die chronischen Krankheiten auf das Fünffache derjenigen bei den 70- bis 85-Jährigen. Dramatisch steigt auch die Zahl der Demenzkranken: von 5 Prozent bei den 70-Jährigen auf fast 50 Prozent bei 90-Jährigen. »Gesundes und menschenwürdiges Altern hat seine Grenzen«, so Paul Baltes vom Max-Planck-Institut für Bildungsforschung. Als Aufgabe haben sich Fachleute die so genannte »Kompression der Mortalität« vorgenommen, »eine Verdichtung der Krankheiten auf die letzten Lebensjahre« (Baltes).



Alt heißt krank und senil – das ist die gängige Gleichung. Doch die Forscher diverser Fachrichtungen schließen sich seit einiger Zeit zusammen, um diese Formel zu durchbrechen. Die Medizin, die uns letztlich ein langes Leben ermöglichte, beginnt allmählich, sich der Probleme des hohen Alters anzunehmen, auch wenn, wie Paul Baltes beklagt, in Deutschland auf gerontologischem Feld noch »ein erheblicher Nachholbedarf besteht«.

Die drängenden Fragen lauten: Warum werden wir immer älter? Warum werden manche älter als andere? Warum erkranken manche im Alter, warum andere nicht? Woran sterben wir letztlich? Mit ihren genetischen, psychologischen, sozialen, hygienischen, technologischen und gesellschaftlichen Faktoren sind solche Themen nur interdisziplinär zu bewältigen.

Darum bemühen sich einige Institutionen intensiv, etwa die MPIs für Bildungsforschung und für demografische Forschung. Sie und andere Institute haben große statistische Studien angelegt, mit denen die Beziehungen zwischen Altern, Langlebigkeit und Mortalität und deren genetischen und umweltbedingten Ursachen geklärt werden sollen. Das große medizinische Problem der Industrienationen, die Gesundheit einer überalterten Bevölkerung, wird endlich auch bei uns ernst genommen.

INHALT

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Temperaturunterschiede in der kosmischen Hintergrundstrahlung enthüllen die Struktur des frühen Universums *Bild: Nasa/WMAP Science Team; Nasa/Esa/S. Beckwith (STScI)/HUDF-Team*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 28

PLANETENFORSCHUNG

Mars im Fokus

Die sensationellen Bilder und Daten von Spirit, Opportunity und Mars Express zeigen deutlich: Einst gab es Wasser auf dem Roten Planeten

SEITE 38

SEXUALENTWICKLUNG

Fremde Geschlechtshormone im Uterus

Außer den eigenen Genen wirken bei der Ausprägung des Geschlechts vor der Geburt vielerlei fremde Stoffe mit. Ein Großteil davon stammt aus der Umwelt



SEITE 56

GEOPHYSIK

Im Wandel der Gezeiten

Wie Seefahrer und Gelehrte über die Jahrhunderte hinweg das Phänomen Ebbe und Flut zu erklären und vorauszuberechnen suchten

SEITE 60

ÖKONOMIE

Märkte im Labor

Modellversuche von Wirtschaftswissenschaftlern zeigen: Die Märkte, auf denen echte Güter gehandelt werden, folgen erkennbaren Regeln; Finanzmärkte verhalten sich dagegen völlig irrational und unvorhersehbar

SEITE 72

UMWELT

Verschmutzung der Pole mit Quecksilber

Die globale Erwärmung scheint indirekt dafür zu sorgen, dass sich in den Polarregionen giftiges Quecksilber aus der Luft im Schnee ansammelt – mit bedrohlichen Folgen für das Ökosystem.




SEITE 46

TITELTHEMA SERIE: KOSMOLOGIE (TEIL I)

Die Symphonie der Schöpfung

Neue Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen, dass das frühe Universum von harmonischen Schwingungen erfüllt war: Das urtümliche Plasma vibrierte wie Luft in einer Orgelpfeife

SEITE 80

ESSAY

Missverständnisse

Unser Gehirn ist durch evolutive Anpassung darauf programmiert, Ordnung in die wahrgenommenen Dinge zu bringen. Oft aber irrt es sich dabei – und wir merken nichts davon

SEITE 84

ARCHÄOLOGIE

Farbenfrohe Antike

Auch wenn die Einsicht schmerzt: Das Bild einer Antike, die in edlem, weißem Marmor daherkommt, ist falsch. In Wahrheit war die Welt der alten Griechen und Römer knallbunt



MAI 2004

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Lichtaktivierte Medikamente

Vielleicht stecken sie hinter Vampirlegenden: bestimmte Farbstoffe, die nach Lichteinfall Gewebe zerstören. Viel interessanter aber ist ihr medizinisches Potenzial, unter anderem gegen Krebs

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

DNA ist nicht alles

März 2004

O Wunder der modernen Genetik: Ein Hammel wird zum Stammvater einer großen Schafherde! In der klassischen Tierzucht gelingt so etwas weder mit einem Hammel noch Ochsen, Wallach oder Kapaun, denn alle sind kastriert.

Prof. Dr. Dieter Böning, Berlin

Grenzen der Berechenbarkeit

Februar 2004

Meines Erachtens enthält die Darstellung der Unentscheidbarkeit des Halteproblems einen schwer wiegenden Fehler. Ob ein Programm anhält oder nicht, kann auch von dessen Eingabedaten abhängen. Der Haltetestverderber (HTV) jedenfalls ist per definitionem ein solches Programm. In dem Artikel war die Rede von einem HTV, der eine identische Kopie seiner selbst untersucht und weiter nichts. Was geschieht, wenn man einen HTV ohne Eingabedaten laufen lässt, hängt von dessen Programmierung ab. Wenn ein HTV einen HTV mitsamt den angefügten Eingabedaten x analysiert, ergibt sich eine doppelte Negation und damit das gleiche Halteverhalten wie x. In keinem Fall kommt dabei eine Selbstbezüglichkeit oder ein innerer Widerspruch zu Stande.

Ralf Sobe, Bonn

Antwort der Redaktion:
Gregory Chaitin hat in der Tat der Kürze zuliebe die Eingabedaten nicht ausdrücklich erwähnt. Eine ausführlichere Erklärung von Turings Beweis findet sich in der »Wikipedia« (http://en.wikipedia.org/wiki/Halting_problem).

Angenommen, es gäbe einen Haltetester, das heißt ein Programm namens HALT *(a,i)*, das als Eingaben zwei Zeichenfolgen *a* und *i* entgegennimmt und »Ja« sagt, wenn das Programm *a* (genauer: das durch die Zeichenfolge *a* beschriebene Programm) mit den Eingabedaten i anhält, und »Nein« im anderen Fall.

Dann definieren wir einen Haltetestverderber als Programm HTV*(a)*, das nur eine Eingabe *a* entgegennimmt und Folgendes tut: Es ruft HALT mit den beiden Eingaben *a* und *a* auf. Wenn HALT*(a,a)* »Nein« sagt, dann sagt es »Ja« und hält an; sonst vollführt es eine unendliche Schleife. Wir geben nun dem Programm HTV seinen eigenen Text als (einzige) Eingabe, das heißt, wir fragen: Hält HTV (HTV) an?

Nehmen wir an, HTV (HTV) hält an. Dann muss HALT (HTV, HTV) »Nein« gesagt haben; also ist der Haltetester zu dem Ergebnis gekommen, dass HTV (HTV) nicht anhält: Widerspruch.

Nehmen wir an, dass HTV (HTV) nicht anhält. Das kann nicht daran liegen, dass das von HTV aufgerufene Programm HALT nicht anhält; denn HALT hält nach Voraussetzung immer an. Also muss HTV in seine unendliche Schleife gegangen sein, also hat HALT »Ja« gesagt, also hält HTV (HTV) an: Widerspruch. Da beide Fälle auf einen Widerspruch führen, muss die ursprüngliche Annahme, es gebe einen Haltetester, falsch sein.

Quanten der Raumzeit

März 2004

In dem Kasten auf Seite 62 heißt es, dass sich Gammastrahlen höherer Energie schneller ausbreiten als solche niedrigerer Energie. Im Artikel wird dies mit der Analogie zur Brechung von Licht in Wasser erklärt.

Bei der normalen Brechung ist es aber so, dass der Brechungsindex mit der Energie der Strahlung steigt; z. B. wird blaues Licht stärker gebrochen als rotes.

Auch eine andere Stelle im Text scheint mir darauf hinzudeuten, dass der Effekt in Wirklichkeit umgekehrt ist. Sie schreiben, »dass die universelle Lichtgeschwindigkeit nur für Photonen niedrigerer Energie exakt gilt, das heißt für langwelliges Licht«. Wenn der Effekt wie beschrieben auftritt, heißt das, dass die Photonen hoher Energie schneller sind als die universelle Lichtgeschwindigkeit?

Dr. Stefan Linkersdörfer, Wiesloch

Antwort des Autors Lee Smolin:
Ich muss mich da für eine Ungenauigkeit entschuldigen. Die Aussage im Kasten, dass sich hochenergetische Photonen schneller fortpflanzen als niederenergetische, stammt so nicht von mir. Ich hätte das korrigieren müssen. Die korrekte Aussage ist die im Fließtext: Nach Berechnungen von Gambini und Pullin »sollten die Photonen je nach ihrer Energie geringfügig verschiedene Geschwindigkeiten haben ...«.

Leider fehlte in der Endversion des Artikels der Platz für zwei wichtige Zusätze:

1. In der Berechnung von Gambini und Pullin hängt der Effekt von der Polarisation ab: Energiereichere Photonen mit einer bestimmten Polarisation sind schneller, während energiereichere Photonen, die anders polarisiert sind, sich langsamer fortbewegen.

2. Die Berechnungen hängen von Annahmen über das Vakuum ab, und je nachdem kommen unterschiedliche Vorhersagen heraus.

Somit haben wir zwar Indizien für einen Effekt, bei dem die Geschwindigkeit eines Photons von der Energie abhängen kann, aber die Details werden noch erforscht – darum meine vorsichtigere Formulierung im Fließtext.

Zusätzlich gilt, dass andere Theorien als die Loop-Quantengravitation für diesen Effekt andere Vorhersagen treffen.



KENN BROWN

▲ **Zersplitterte Raum-Zeit: Die Loop-Quantengravitation, eine neue Theorie zur Vereinigung aller Naturkräfte.**

Sicherungen

Leserbrief, März 2004

Was Herr Becker hier schreibt, halte ich doch für sehr gefährlich, da im Leserbrief der Eindruck entsteht, dass Netzleitungen mit 230 V Wechselspannung gefahrlos angefasst werden können.

Dass man sehr wohl an Leitungen, an denen Wechselspannung anliegt, »kleben« bleiben kann, weiß ich sowohl aus der einschlägigen Fachliteratur als auch aus eigener Erfahrung.

Die Umstellung von Gleich- auf Wechselstrom hat

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

übrigens mehrere Gründe. Hier zwei wichtige: So kann man zum Beispiel Gleichspannung nicht hoch- und heruntertransformieren, um größere Strecken mit höherer Spannung und damit weniger Verlusten transportieren zu können. Ein weiteres Beispiel ist, dass beim Abschalten eines Stromkreises ein Lichtbogen entsteht, welcher bei Gleichstromkreisen wesentlich schwieriger zu löschen ist als bei Wechselstromkreisen.

Die maximale Wechselspannung, die als ungefährlich gilt, ist übrigens niedriger als die maximale Gleichspannung! (Die aktuellen Werte laut VDE-Vorschriften liegen für Menschen bei 50 Volt für Wechselstrom und 60 Volt für Gleichstrom. Die Redaktion.)

Dipl.-Ing. (FH) Rainer Specker, Tettnang

Warum wir schlafen

Januar 2004

Im Energiesparmodus

Auffallend ist, dass bei vielen Tieren der Schlaf in einem mit dem Tageslauf korrespondierenden Rhythmus stattfindet. Das ist wohl kaum Zufall: Offensichtlich ist es für die jeweilige Tierart in ihrer ökologischen Nische von Vorteil, zu bestimmten Zeiten zu schlafen. Vorstellbar wäre, dass so Zeitabschnitte des Tageslaufs, die von einem aktiven Tier nur ungenügend oder erschwert genutzt werden könnten (zum Beispiel zur Ernährung oder Fortbewegung), im »Energiesparmodus« verbracht werden (geringerer Energieverbrauch bringt evolutionären Vorteil).

Zu denken ist beispielsweise an tageszeitlich schwankendes Nahrungsangebot, veränderliche Bedrohung durch Räuber, an nächtliche Dunkelheit oder mittägliche Hitze. Ähnlichkeiten und Unterschiede zu jahreszeitlichen Rhythmen (z. B. Winterschlaf) eröffnen weitere Aspekte.

Gerhard Steinmetz, Schwaig

Sinnvolle Nutzung

Das Schlafen dient sicherlich nicht nur der Erholung des Zentralnervensystems, sondern auch des übrigen Körpers. Andernfalls wäre nicht zu erklären, warum wir nach anstrengenden körperlichen Tätigkeiten schläfrig werden. Auch aus evolutionärer Sicht wäre es eine Verschwendung für ein Lebewesen, die Ruhephasen seines Körpers nicht sinnvoll zu nutzen, zum Beispiel um angestaute Stoffwechselprodukte abzubauen und abzutransportieren oder andere Reparaturmaßnahmen zu ergreifen.

Ting Chen, Frankfurt am Main

Rückkehr zum Mond

Februar 2004

Bei der Lektüre dieses Beitrags kam mir der Gedanke, dass es sich bei den vielen Kratern, die hier zu sehen sind, nicht um Einschlagkrater von Meteoriten, sondern um Entladungskrater handeln könnte. Man sollte nämlich erwarten, dass nicht alle Meteoritenkrater so kreisrund sind, wie sie sich hier darbieten, denn zumindest einige der Einschläge dürften in so spitzem Winkel auf die Mondoberfläche getroffen sein, dass sie entsprechend exzentrisch geformte Verwerfungen hervorgerufen haben sollten.

Joseph Bülhoff, Werne

Antwort der Redaktion:

Auch wenn ein Meteorit schräg auf die Mondoberfläche auftrifft: Der entstehende Krater ist in der Regel tatsächlich kreisrund. Der Aufprall erzeugt nämlich eine Stoßwelle und eine nachfolgende Entlastungswelle im Gestein, wodurch dieses komprimiert wird, schmilzt und verdampft. Letztlich ist es diese allseitig expandierende Gesteinsblase, die den Krater erzeugt. Dessen Durchmesser ist weitaus größer als der des eingeschlagenen Objekts, sodass die Information über die Einschlagsrichtung verloren geht.

Errata

Eisschmelze am Nordpol

März 2004

An der Farbskala für die Eisdicke auf Seite 30 müsste in der Mitte 0 statt 25 stehen. Die Ordinate der Grafik auf Seite 31 gibt nicht die Fläche, sondern die Flächenänderung in Millionen Quadratkilometern an.

Quanten der Raumzeit

März 2004

In den Kästen auf den Seiten 56 und 57 steht fälschlicherweise, dass eine Kubik-Planck-Länge gleich 10^{-99} Zentimeter ist. Hier haben wir leider »Kubik« unterschlagen. Selbstverständlich sind das 10^{-99} Kubikzentimeter.

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. 0211 90833-57, Fax 0211 90833-58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Hermann Englert, Dr. Werner Gans, PD Dr. Udo Gansloßer, Stephen Koszudowski.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. 06201 6061-50, Fax 06201 6061-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. 0211 88723-79, Fax 0211 88723-99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686150, Fax 030 6159005, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Detlef Cölln, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183/-183/ -193, Fax 040 339090; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67 D-40213 Düsseldorf, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 301352060, Fax 0211 133974; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Klaus Haroth, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-36, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-40, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. 089 545907-14, Fax 089 545907-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson

SPEKTROGRAMM



IMMUNABWEHR

Die Fangnetze der Bakterienjäger

Weiße Blutkörperchen bilden die Hauptverteidigungslinie des Körpers gegen Krankheitskeime. Sie bestehen zu 50 bis 80 Prozent aus so genannten Neutrophilen, die eingedrungene Bakterien verschlingen und anschließend verdauen. Doch offenbar können die Abwehrzellen noch mehr. Nun hat ein Forscherteam um Arturo Zychlinsky und Volker Brinkmann vom Berliner Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie entdeckt, dass die Neutrophilen auch regelrechte Netze herstellen und auswerfen, um Bakterien einzufangen.

Überraschenderweise besteht dieses Gespinst hauptsächlich aus Chromatin: einer Mischung aus Nucleinsäuren und Proteinen, die eigentlich nur im Zellkern vorkommt und dort Träger der Erbinformation ist. Wie die Berliner Forscher zeigen konnten, bleiben schädliche Bakterien daran kleben. Außerdem verfügen die Netzfäden über Enzyme, die krank machende Proteine auf der Oberfläche der Mikroben auflösen und die Erreger auf diese Weise entwaffnen. Die Histone – spulenartige Eiweißstoffe im Chromatin, um die der DNA-Faden gewickelt ist – betätigen sich dann als schlagkräftige Bakterienkiller. Eines ist allerdings noch unklar: wie die weißen Blutkörperchen ihre Fangnetze absondern. *(Science, Bd. 303, S. 1532)*

VERHALTEN

Geburtenkontrolle à la Ameise

Im Ameisenstaat herrscht strikte Aufgabenteilung. Die Königin sorgt für den Nachwuchs, und die vielen tausend Arbeiterinnen erledigen den Rest. Dabei könnten sie – rein biologisch gesehen – ebenfalls Eier legen. Warum sie es nicht tun, hat jetzt ein deutsch-englisches Forscherteam um Annett Endler und Jürgen Liebig vom Biozentrum der Universität Würzburg definitiv geklärt. Schon bisher vermutete man, dass ein Duftstoff im Spiel ist.



A. ENDLER, BIOZENTRUM DER UNIVERSITÄT WÜRZBURG

Jetzt zeigten chromatografische und massenspektrometrische Untersuchungen, dass es sich um eine Mixtur aus Kohlenwasserstoffen handelt, mit der die Königin die Eier markiert.

Zum Beweis führten die Forscher eine Reihe von Experimenten durch. Wenn sie zum Beispiel die Königin entfernten, fingen die Arbeiterinnen nach gut 160 Tagen an, sich selbst fortzupflanzen. Allerdings fraßen ihre Kolleginnen die nicht königlichen Eier auf. Wurden diese jedoch von den Forschern mit dem Kohlenwasserstoff-Cocktail der Herrscherin bestrichen, blieben sie verschont. Zudem hörten die Arbeiterinnen daraufhin wieder auf, eigene Eier zu produzieren. *(Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 101, S. 2945)*

Der Geruch macht's: Ein spezieller Duftstoff der Königin an den Eiern veranlasst die Arbeiterinnen, selbst auf die Fortpflanzung zu verzichten.

ARCHÄOLOGIE

Rotwein für Pharao

Die alten Ägypter gaben ihren Verstorbenen alles Erdenkliche mit ins Grab, damit diese im Totenreich nicht mit leeren Händen dastanden. Bei Herrschern gehörte auch Wein zur Verpflegung für das Jenseits. Das beweisen Krüge, die mit dem Kelterjahr, der Herkunft der Trauben und sogar dem Namen des Winzers beschriftet sind. Allerdings blieb bisher unklar, welche Farbe das Tröpfchen zur Stärkung des Verblichenen hatte. Nun konnten Maria Rosa Guasch-Jané und Rosa M. Lamuela-Raventós von der Universität Barcelona erstmals nachweisen, dass sich in den Krügen im Grab von Tutenchamun unter anderem Rotwein befand.

Mit chromatografischen und massenspektroskopischen Methoden entdeckten die spanischen Forscherinnen die so genannte Syringasäure – ein Zersetzungsprodukt des Anthocyan-Farbstoffs Oenin, der in der Schale blauer Trauben vorkommt. Demnach verstanden die alten Ägypter schon



◄ Im Fangnetz der weißen Blutkörperchen hängen stäbchenförmige Bakterien fest. Die Szene wurde mit dem Elektronenmikroskop aufgenommen und künstlich eingefärbt.

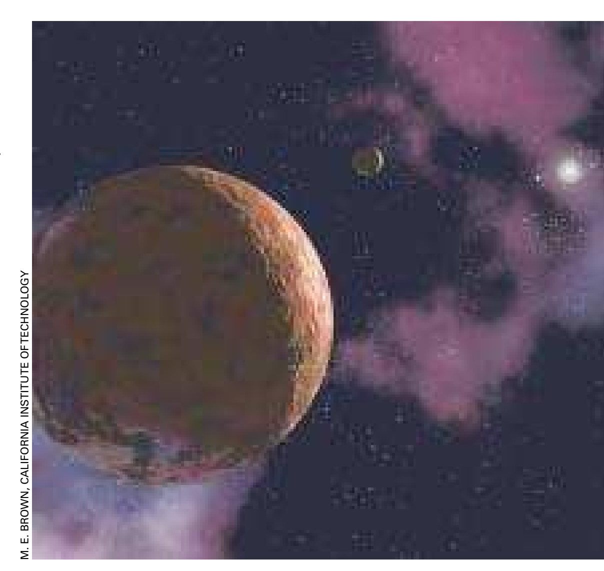
MPI FÜR INFEKTIONSBIOLOGIE

ASTRONOMIE

Der zehnte Planet?

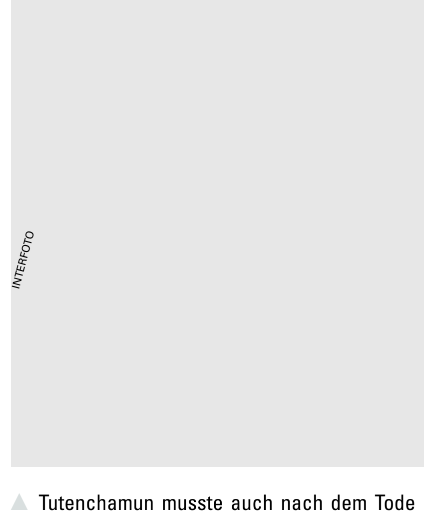
Mit einem Durchmesser von 1700 Kilometern ist er nur wenig kleiner als Pluto. Damit hat der Brocken aus Stein und Eis, den jetzt ein Forschertrio um Michael E. Brown vom California Institute of Technology in Pasadena mit dem Mount-Palomar-Observatorium aufspürte, durchaus das Zeug zu einem Planeten. Auch mit einem klangvollen Namen kann er aufwarten: Sedna nannten ihn seine Entdecker nach einer Meeresgöttin der Eskimos.

Ob der ferne Sonnentrabant die Bezeichnung »Planet« wirklich verdient, ist dennoch fraglich. Seine Entfernung zum Zentralgestirn beträgt nämlich derzeit stattliche 13 Milliarden Kilometer – das Dreifache der Distanz von Pluto. Als wäre das nicht genug, führt ihn seine Bahnkurve zeitweise sogar noch zehnmal weiter von der Sonne weg. Für einen vollen Umlauf braucht er folglich 10 500 Jahre. Damit treibt sich Sedna so weit draußen im Sonnensystem herum wie kein anderer bekannter Himmelskörper. Seine riesige Bahn lässt vermuten, dass er aus der Oortschen Wolke stammt – jener Ansammlung von Eis-Objekten in den Tiefen des Alls, die unser Sonnensystem wie eine Schale umschließt und als Ursprungsort der Kometen gilt. Dort könnte es viele weitere Brocken mit Durchmessern von mehreren hundert Kilometern geben. Von der Sonne werden sie kaum noch gewärmt: Auf Sedna herrschen –240 Grad Celsius.



M. E. BROWN, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

▲ Weit draußen am Rand des Sonnensystems zieht Sedna – hier in künstlerischer Darstellung – seine einsame Bahn.



INTERFOTO

▲ Tutenchamun musste auch nach dem Tode nicht auf Rotwein verzichten.

vor über 3300 Jahren eine Menge vom Weinbau. Um Rotwein zu erhalten, muss der Winzer die Maische in Gegenwart der Schale vergären, damit sich der Farbstoff herauslöst.
(Analytical Chemistry, Bd. 76, S. 1672)

EVOLUTION

Kultur fördert Fremdenangst

Die kulturelle Vielfalt auf der Welt ist enorm: Es gibt gut 7000 verschiedene Sprachen, patriarchalische und matriarchalische Gesellschaften, Hirten-, Bauern- und Seevölker, Poly- und Monogamie, unterschiedlichste Ernährungsformen und diverse Religionen. Obwohl alle Menschen äußerst ähnliche Erbanlagen haben, bilden sie Gemeinschaften, die sich mit ihren spezifischen Lebensweisen deutlich voneinander abgrenzen.

Warum die kulturelle Zersplitterung? Mark Pagel von der Universität Reading und Ruth Mace vom University College London sehen vor allem zwei Gründe dafür. Einerseits besteht bei großen Gemeinschaften generell die Tendenz, dass sich kleine Gruppen abspalten; denn stets trachten Einzelne danach, wertvolle Ressourcen unter ihre eigene Kontrolle zu bringen. Andererseits mussten unsere Vorfahren Interessengemeinschaften bilden, weil bestimmte Dinge nur gemeinsam zu bewältigen waren – etwa die Jagd auf große Beutetiere oder die Bekämpfung von Eindringlingen.

Mit der Gruppenbildung wuchs aber auch die Gefahr von Schmarotzern, die sich von der Allgemeinheit aushalten lassen. Dem ließ sich nur durch ein ausgeklügeltes Kooperations- und Bestrafungsverhalten innerhalb der Gruppe begegnen. Und das wiederum setzte voraus, dass Fremden der Zugang zur Gemeinschaft erschwert wurde: Betrüger hatten so eine geringere Chance, sich einzuschleichen und den Zusammenhalt der Gruppe auszunutzen.

Das Streben nach Anerkennung in der Gesellschaft sitzt psychologisch tief in uns – die gemeinsame Abgrenzung gegenüber Fremden aber vermutlich auch. *(Nature, Bd. 428, S. 275)*


Lässt sich der Sonnenofen wirklich auf dem Labortisch zünden?

R. TALEYARKHAN

PHYSIK

Kernfusion im Labor – die zweite!

Die Wellen schlugen hoch, als Rusi Taleyarkhan 2002 am Oak Ridge National Laboratory (Tennessee) über seine angeblich erfolgreichen Experimente zur »kalten« Fusion auf dem Labortisch berichtete. Die Skepsis war groß; denn die Physiker erinnerten sich nur zu genau an den Flop jener berüchtigten kalten Fusion, die 1989 Schlagzeilen machte. Doch Taleyarkhan ließ sich nicht entmutigen und hat seinen Versuch jetzt an der Purdue-Universität in West Lafayette (Indiana) wiederholt – mit noch überzeugenderem Ergebnis, wie er meint.

Bei seiner Kernverschmelzung en miniature nutzt er das Prinzip der Kavitation: In mit Deuterium angereichertem Aceton, einem organischen Lösungsmittel, erzeugen er und seine Mitarbeiter durch Beschuss mit Neutronen winzig kleine Bläschen. Zugleich setzen sie die Flüssigkeit starkem Ultraschall aus. Dadurch blähen sich die Gasbläschen auf, um schließlich in sich zusammenzufallen. Bei dieser Implosion entstehen auf kleinstem Raum kurzzeitig ungeheure Temperaturen und Drücke, von denen man bisher schon wusste, dass sie Strahlungsblitze hervorrufen – ein als Sonolumineszenz bekanntes Phänomen.

Nach Berechnungen der US-Forscher werden die Deuterium-Atome so stark gequetscht und erhitzt, dass sie sogar zu Helium verschmelzen. Den experimentellen Beweis liefern typische Nebenprodukte der Fusion, die sich angeblich aufspüren lassen: Gammastrahlen, Neutronen und Tritium. Wenn Taleyarkhan Recht hat, können wir alle Energiesorgen vergessen. Doch bislang fehlt die unabhängige Bestätigung seiner Ergebnisse. *(Physical Review E, Bd. 69, 036109)*

TECHNIK

Fokussierbare Minilinse aus Wasser

Fotohandys sind der letzte Schrei, aber ihre Bildqualität lässt zu wünschen übrig, weil sie nur eine starre Linse mit fester Brennweite haben. Richtige Fotoapparate verfügen über komplizierte Optiken, damit sich der Fokus verändern und das Bild auf verschiedene Entfernungen scharf stellen lässt.

Doch es geht auch anders. Forscher vom niederländischen Elektronikkonzern Philips haben nun mit einfachsten Mitteln eine verformbare Linse realisiert. Sie besteht im Wesentlichen nur aus einem Tropfen Wasser in Öl. Beide Flüssigkeiten befinden sich in einer kleinen Röhre, die an den Enden mit durchsichtigen Kappen verschlossen ist. Die Innenwände des Gefäßes und eine der Kappen sind mit einem hydrophoben Lack überzogen und werden deshalb nur vom Öl benetzt. Das Wasser sammelt sich am anderen Ende der Röhre und bildet dort einen konvexen Tropfen, der durchtretendes Licht bündelt.

Durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die Gefäßwand lässt sich deren hydrophobe Wirkung verringern. Daraufhin beginnt das Wasser, sie zu benetzen. Die Form der Grenzfläche zum Öl ändert sich dadurch von konvex über flach bis zu konkav, was eine stufenlose Veränderung der Brennweite zwischen fünf Zentimetern und unendlich erlaubt – in nur zehn Millisekunden. In Tests überstand die Linse mehr als eine Million Fokussierungen. Der Stromverbrauch ist vernachlässigbar. Vielleicht liefern also schon bald auch Fotohandys gestochen scharfe Bilder.


Kleiner als eine Fingerkuppe: die neue Flüssiglinse von Philips

PHILIPS

KOSMOLOGIE

Uralte Galaxien

Den Effekt kennt jeder, der in einen dunklen Raum tritt: Das Auge braucht eine Weile, bis es Einzelheiten wahrnimmt. Und so musste auch das Hubble-Weltraumteleskop sehr lange hinsehen, um die Schwärze des Alls unterhalb des Sternbilds Orion zu durchdringen.

Gleich mehrere Tage lang blickte es mit zwei Kameras – der Advanced Camera for Surveys (ACS) für normales Licht sowie der Near Infrared Camera and Multi-object Spectrometer (Nicmos) für Infrarotstrahlung – in diese lichtlose Himmelsregion. Doch was es dann offenbarte, ist eine Sensation: gut 10 000 neue Galaxien, die teils vor mehr als 13 Milliarden Jahren entstanden sein dürften – also nur wenige 100 Millionen Jahre nach dem Urknall. Hubble gelang mit dieser Ultra-Deep-Field-Aufnahme der tiefste Blick ins Universum, den je ein Mensch zu sehen bekam.


Die neu entdeckten blutjungen Galaxien haben noch keine Spiralform, sondern sehen aus wie Zahnstocher, Armreife oder Kugeln.

NASA, ESA, S. BECKWITH (STSCI) UND HUDFTEAM

Die extreme Entfernung und damit Jugend der entdeckten Galaxien ergibt sich aus dem Spektralbereich, in dem insbesondere Nicmos beobachtete. Wegen der Expansion des Kosmos gilt: Je mehr Zeit Licht von einem kosmischen Objekt zu uns benötigt, desto mehr erscheint seine Wellenlänge gedehnt. Wenn eine Galaxie, die im sichtbaren Spektralbereich leuchtet, bei uns im wesentlich längerwelligen Infrarotbereich sichtbar ist, muss sie folglich sehr weit weg sein. Den letzten Beweis können allerdings erst genaue spektroskopische Untersuchungen liefern.



NASA / JPL

Strahlende Eisbombe

Im Abstand von nur 237 Kilometern raste Anfang Januar die Nasa-Sonde Stardust mit knapp 22000 Kilometern pro Stunde Relativgeschwindigkeit an dem Kometen Wild 2 vorbei. Dabei gelangen ihr die bisher schärfsten Fotos eines Kometenkerns. Dieser erscheint auf der eindrucksvollen Überlagerung zweier Aufnahmen mit kurzer und langer Belichtungszeit keineswegs als der erwartete schmutzige Schneeball, sondern hat eine kraterübersäte Gesteinskruste. Dennoch muss der fünf Kilometer große Brocken auch reichlich flüchtige Bestandteile enthalten. Davon zeugen die rund zwanzig scharf gebündelten Materiestrahlen, die auf dem überbelichteten Foto aus ihm herausschießen.

Hauptaufgabe von Stardust war es, Teilchen aus dem Schweif des Kometen einzusammeln und zur Erde zu bringen. Im Januar 2006 soll die Rückkehrkapsel in Utah landen. Wild 2 gelangte erst 1974 auf seine jetzige, 6,4-jährige Umlaufbahn, die zwischen Jupiter und Mars verläuft. Deshalb hat er sich bisher nur fünfmal der Sonne genähert und ist noch relativ »frisch«. Bei den eingesammelten Teilchen dürfte es sich also um ursprüngliches Material aus dem solaren Urnebel handeln. Derweil ist die am 2. März gestartete europäische Sonde Rosetta auf dem Weg zu Churyumov-Gerasimenko, wo sie im Jahr 2014 erstmals eine Landeeinheit auf einem Kometen absetzen wird.

GRAVITATIONSWELLEN

Tödlicher Tango

Nicht weit von uns ist sich ein Neutronenstern-Paar auf seiner Todesspirale schon ziemlich nahe gekommen. Seine Entdeckung lässt die Chancen drastisch steigen, Gravitationswellen aus der Verschmelzung solcher Sterne direkt nachzuweisen.

Von Georg Wolschin

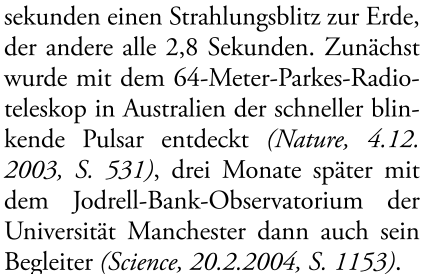
Wenn zwei kompakte, massereiche Himmelskörper in einer kosmischen Pirouette umeinander wirbeln, fasziniert das Astronomen und theoretische Physiker gleichermaßen. Denn wegen der starken Gravitationsfelder der beiden Partner – man denke an Neutronensterne oder Schwarze Löcher – bietet ein solches Binärsystem ideale Bedingungen zum Test eines der bedeutendsten Gedankengebäude des 20. Jahrhunderts: der Allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein. Schon 1916 sagte ihr Schöpfer voraus, dass umeinander rotierende Körper hoher Masse periodische Verzerrungen im Netz der Raumzeit hervorrufen müssten, die sich wellenförmig ausbreiten *(Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48)*. Doch die Entdeckung solcher Gravitationswellen ließ auf sich warten.

Es dauerte genau 62 Jahre, bis Russell A. Hulse und Joseph H. Taylor, damals an der Universität von Massachusetts in Amherst, eine erste indirekte Bestätigung lieferten. Sie hatten mit dem 300-Meter-Radioteleskop in Arecibo auf Puerto Rico lange Zeit akribisch die Umlaufperiode des Pulsars PSR B1913 +16 um einen Begleitstern verfolgt und dabei festgestellt, dass sich die beiden Körper immer enger und schneller umeinander bewegten. Die Ursache war offenbar der Energieverlust durch die Abstrahlung von Gravitationswellen: Der gemessene Effekt stimmte sehr genau – auf etwa 0,5 Prozent – mit der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie überein.

Taylor und Hulse wurden für ihre Entdeckung 1993 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Auch nach ihrem Erfolg blieb allerdings die Herausforderung bestehen, Gravitationswellen direkt nachzuweisen. Deren Frequenz müsste dafür allerdings groß genug sein, um in den Messbereich terrestrischer Gravitationswellen-Interferometer zu fallen, von denen inzwischen vier gebaut wurden: Geo600 (Deutschland), Tama (Japan), Virgo (Italien) und Ligo (USA). Bei PSR B1913+16 wird das erst in etwa 320 Millionen Jahren der Fall sein – kurz bevor die beiden Sterne miteinander verschmelzen.

Eng verschlungenes Pulsar-Paar

Nun aber hat eine internationale Astronomengruppe einen Neutronen-Doppelstern aufgespürt, dessen Todesspirale schon deutlich enger verläuft als beim Hulse-Taylor-Pulsar. Außerdem ist dies das erste solche System, bei dem sich beide Partner als Pulsare identifizieren ließen. Der eine schickt alle 23 Millisekunden einen Strahlungsblitz zur Erde, der andere alle 2,8 Sekunden. Zunächst wurde mit dem 64-Meter-Parkes-Radioteleskop in Australien der schneller blinkende Pulsar entdeckt *(Nature, 4.12. 2003, S. 531)*, drei Monate später mit dem Jodrell-Bank-Observatorium der Universität Manchester dann auch sein Begleiter *(Science, 20.2.2004, S. 1153)*.

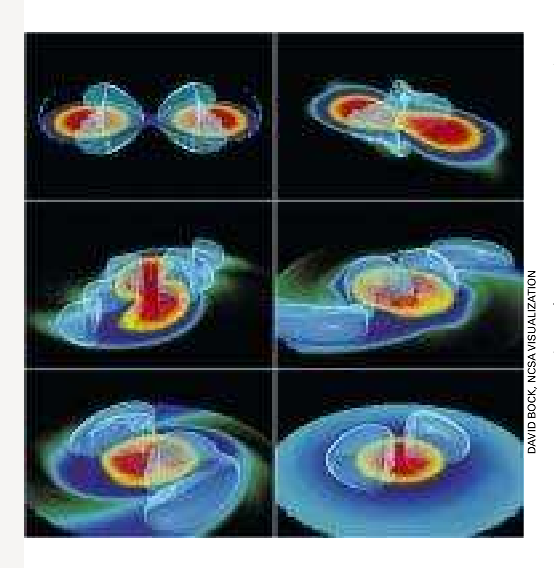


Bei einer Bahnperiode von 2,4 Stunden und einem mittleren Abstand von ungefähr dem Doppelten der Entfernung Erde-Mond kreisen die beiden Sterne, die den Namen PSR J0737-3039A und B erhielten, etwa dreimal so schnell umeinander wie bei PSR B1913 +16. Dadurch sollten sie schon in 85 Millionen Jahren verschmelzen.

Zwar liegt auch das für heute lebende Astronomen in unerreichbarer Zukunft, aber die Entdeckung erhöht die statistische Wahrscheinlichkeit, dass schon relativ bald ein anderer, bisher unbekannter Doppelpulsar fusioniert und seine Gravitationswellen in den vier genannten Interferometern registriert werden: Ging man bisher von einer direkt nachweisbaren Verschmelzung in zehn bis zwanzig Jahren aus, reduziert sich diese Zeitspanne nun auf ein bis zwei Jahre.

Die alten Schätzwerte für die Fusionsrate lagen vor allem deshalb so niedrig, weil Paare von zwei Neutronensternen oder auch Schwarzen Löchern etwas sehr Seltenes zu sein schienen. Zwar gehören mehr als die Hälfte aller gewöhnlichen Sterne zu Doppel- oder Mehrfachsystemen, aber Neutronensterne und stellare Schwarze Löcher sind Überreste von Supernova-Explosionen am Ende der stellaren Entwicklung, und bei solchen Ausbrüchen werden die früheren Partner in der Regel weggefegt oder zerstört. Deshalb kannten die Astronomen bis zur jetzigen Entdeckung insgesamt nur fünf Neutronen-Doppelsterne.

Bei zweien halten die Partner noch so viel Abstand, dass die Zeit bis zu ihrer Verschmelzung größer ist als das Alter des Universums von 13,7 Milliarden Jahren. Von den drei anderen wiederum befinden sich nur zwei in der galaktischen Scheibe; der dritte tummelt sich im Außenbereich eines Kugelsternhaufens im galaktischen Halo und trägt sehr wahrscheinlich wenig zur Fusionsrate innerhalb der Milchstraße bei. Diese wird hauptsächlich von dem Objekt mit der kürzesten Restlebensdauer (bisher war das PSR B1913+16) bestimmt – und

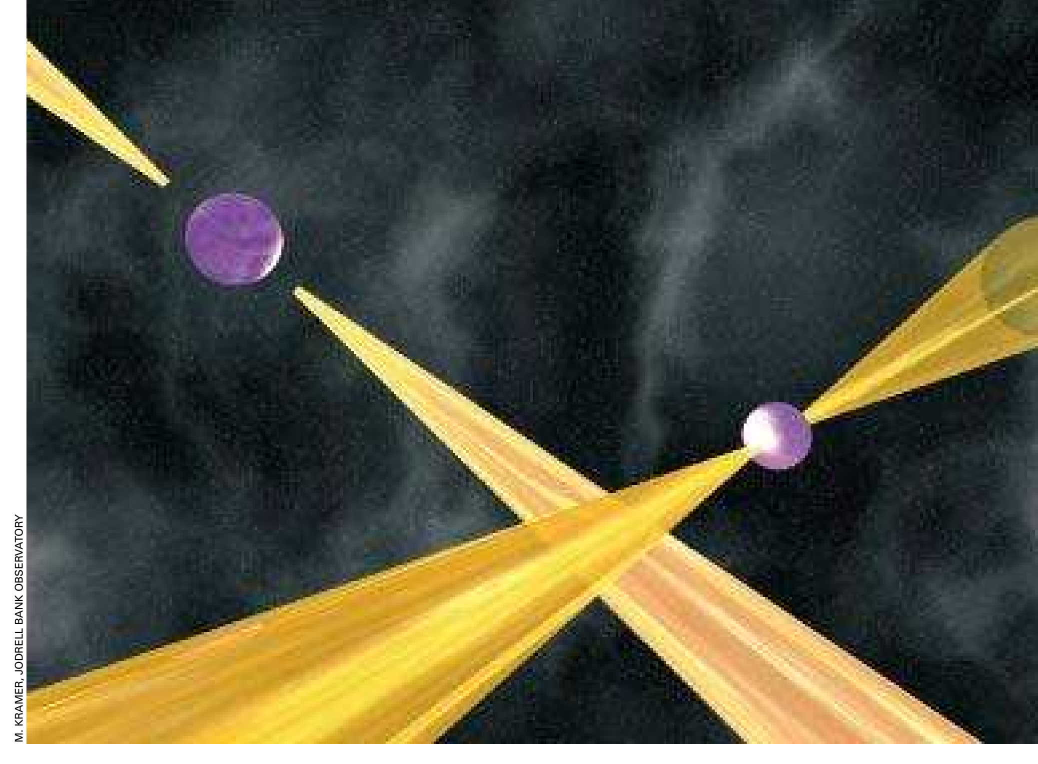


DAVID BOCK, NCSA VISUALIZATION

Wenn zwei Neutronensterne sich nähern und miteinander verschmelzen, verzerren sie im Takt ihres Paartanzes die Raumzeit und strahlen Gravitationswellen entsprechender Frequenz aus. Dargestellt sind einzelne Stadien dieses Vorgangs, wie sie sich aus einer Simulation ergeben. Dabei wurde jeweils nur ein Schnitt durch die Achse des Systems abgebildet. Die Materiedichte ist farbcodiert und steigt von Blau nach Rot an. Die durchsichtige »Zellophan«-Hülle veranschaulicht die Emission der Gravitationswellen.

schnellt durch die jetzige Entdeckung deshalb dramatisch in die Höhe.

Bei der revidierten Schätzung spielt aber auch eine Rolle, dass der neue Neutronen-Doppelstern weitaus schwächere Radiosignale aussendet als der von Hulse und Taylor untersuchte. Nur wegen seiner zehnmal geringeren Entfernung von unserem Sonnensystem, die lediglich etwas weniger als 2000 Lichtjahre beträgt, wurde er trotzdem entdeckt. Sehr wahrscheinlich sind also viele ähnliche Objekte bisher übersehen worden, weil die Astronomen gewöhnlich nur unter genügend intensiven Radioquellen nach Neutronen-Doppelsternen suchen.

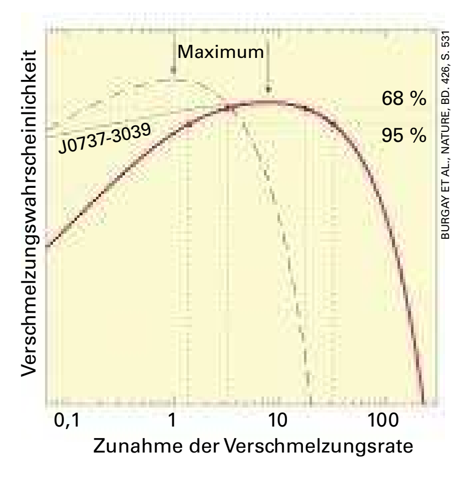

M. KRAMER, JODRELL BANK OBSERVATORY

▲ Die beiden neu entdeckten Neutronensterne – hier schematisch gezeichnet – umkreisen einander in einem mittleren Abstand von nur etwa dem Doppelten der Entfernung Erde-Mond. Beide senden Strahlungskegel aus, die im Rhythmus ihrer Eigenrotation – bei dem einen 3000, beim anderen 22 Umdrehungen pro Minute – die Erde überstreichen.

Messung relativistischer Effekte

Sollte tatsächlich alle ein bis zwei Jahre eine Verschmelzung stattfinden, hätte die heutige Forschergeneration bereits realistische Aussichten auf den direkten Nachweis der lang gesuchten Gravitationswellen. In jedem Fall wird sich mit den jetzt vorhandenen Interferometern schon nach wenigen Betriebsjahren sagen lassen, ob die revidierte Fusionsrate und die zu Grunde liegenden Annahmen über die Menge der Neutronen-Doppelsterne in der Milchstraße sowie die Anzahl der Galaxien innerhalb der Reichweite der Instrumente stimmen oder ob vielleicht sogar – was niemand ernsthaft erwartet, aber mancher ehrgeizige Jungforscher insgeheim erhoffen mag – der große Einstein irrte.

▼ Die mutmaßliche Verschmelzungsrate von Neutronen-Doppelsternen (rote Kurve) hat sich mit der Entdeckung von PSR J0737-3039 gegenüber früheren Abschätzungen (gestrichelte Kurve) deutlich erhöht. Dadurch dürfte es wesentlich früher gelingen, hochfrequente Gravitationswellen, die während der Fusion ausgesandt werden, mit terrestrischen Interferometern wie Geo600 nachzuweisen.



BURGAY ET AL., NATURE, BD. 426, S. 531

Dem Heroen der modernen Physik wird aber noch auf andere Art auf den Zahn gefühlt. PSR J0737-3039A und B kreisen nämlich nicht nur sehr schnell, sondern auch auf einer exzentrischen Bahn umeinander. Damit eignet sich der Doppelpulsar gleichzeitig zum Test von weniger spektakulären Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Einige dieser relativistischen Effekte sind zwar schon durch Messungen im Sonnensystem bestätigt worden, sollten bei Neutronen-Doppelsternen aber wesentlich deutlicher ausfallen als bei Planeten. Das gilt vor allem für die Vorhersage, dass sich die Achse der elliptischen Bahn langsam in ihrer Ebene dreht, wodurch sich das Periastron, der Zeitpunkt größter Annäherung der beiden Sterne, mit jedem Umlauf ein wenig verschiebt.

Das bekannteste Gegenstück im Sonnensystem ist die Periheldrehung von Merkur: die allmähliche Drift des sonnennächsten Punktes auf der Bahn des innersten Planeten. Ihre Erklärung durch die Allgemeine Relativitätstheorie trug einst wesentlich zu deren Durchbruch bei. Beim Hulse-Taylor-Pulsar rotiert die Bahnachse immerhin schon 36 000-mal so schnell wie bei Merkur – auch hier in Einklang mit Einstein. Beim jetzt entdeckten System steigt dieser Wert nochmals auf das Vierfache: Die gemessene Periastron-Verschiebung beträgt mehr als 16 Grad pro Jahr.

Bei dem neuerlichen Test erweist sich auch die größere Nähe des Systems als Vorteil. Dadurch erhöht sich die Genauigkeit der Messungen. Zusätzlich verliert die Eigenrotation der Milchstraße, die als Korrekturglied in das Messergebnis eingeht und dessen Präzision entscheidend beeinflusst, mit sinkendem Abstand an Bedeutung. Das betrifft auch drei weitere Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie wie die so genannte geodätische Präzession, die bei anderen Systemen bisher nur ungenau bestimmt werden konnte.

PSR J0737-3039 bietet sich somit als ein viel versprechendes kosmisches Laboratorium an, das es ermöglicht, subtile theoretische Voraussagen für hochrelativistische Systeme mit bisher unerreichter Präzision zu testen. Vielleicht werden sogar winzige Effekte erstmals nachweisbar, die der Messung bisher völlig unzugänglich waren. ◁

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik und ist Wissenschaftsjournalist.

GENTECHNIK

Maßgeschneiderte Antibiotika

Immer mehr Bakterien entwickeln Resistenzen gegen die üblichen Breitband-Antibiotika. Gentechnisch hergestellte Substanzen, die gezielt nur einen ganz bestimmten Erreger angreifen, könnten den rettenden Ausweg bieten.

Von Petra Jacoby

Mit Penicillin und seinen Verwandten verfügt der Mensch seit Mitte des letzten Jahrhunderts über schlagkräftige Waffen gegen bakterielle Invasoren. Aber die Mikroben rüsten beständig nach und entwickeln zunehmend Strategien, um den Attacken der Medikamente zu entgehen. Dabei kommt ihnen zugute, dass die meisten Antibiotika nicht nur gegen den eigentlichen Krankheitserreger wirken, sondern auch harmlose Vertreter der normalen Körperflora – beispielsweise im Darm – angreifen.

Das verschafft den Übeltätern eine Vielzahl von Leidensgenossen, die unter dem gleichen hohen Selektionsdruck stehen, eine Resistenz gegen das Antibiotikum auszubilden. Erwirbt nun irgendein Keim durch eine Mutation zufällig die Fähigkeit, das Medikament unschädlich zu machen, kann er das betreffende Gen in andere Bakterien einschleusen – auch in Vertreter fremder und möglicherweise gefährlicher Arten.

Über diesen Mechanismus wurden in den letzten Jahrzehnten unabsichtlich immer mehr Krankheitserreger herangezüchtet, die gleich gegen eine Vielzahl von Arzneimitteln immun sind. Ein brisantes Beispiel ist der Eitererreger *Staphylococcus aureus*. Besonders in Krankenhäusern kursieren multiresistente Stämme, die jedes Jahr mehrere tausend Fälle von schwer behandelbaren Lungenentzündungen und Wundinfektionen bei geschwächten Patienten hervorrufen.

Erst kürzlich geriet *S. aureus* wieder in die Schlagzeilen, als man bei einer Frau aus den USA einen Stamm feststellte, der auch gegen Vancomycin unempfindlich ist – eines der drei Antibiotika, die als letzte Rettung bei Infektionen mit multiresistenten Staphylokokken eingesetzt werden. Diese alarmierende Nachricht verdeutlicht, wie dringend wir neue Strategien zur Therapie bakterieller Erkrankungen benötigen.

George Wu vom Gesundheitszentrum der Universität von Connecticut in Farmington (USA) und seine Kollegen an der Universität von Sichuan in Chengdu (China) haben nun eine elegante Methode entwickelt, um hochspezifische Antibiotika herzustellen, die nur eine ganz bestimmte Bakterienart angreifen und dabei sogar multiresistente Keime vernichten *(Nature Biotechnology, Bd. 21, S. 1480)*. Der Prototyp dieser neuen Medikamentenklasse richtet sich gegen den berüchtigten Problemkeim *S. aureus*. Es handelt sich um ein künstlich erzeugtes Eiweißmolekül, das aus zwei Teilen zusammengefügt wurde.

Zielgenaue Kombiwaffe

Ein Abschnitt ist Colicin Ia aus dem Darmbakterium *Escherichia coli*. Diese Substanz lagert sich in Zellmembranen ein und bildet dort tödliche Löcher. Allerdings wirkt sie normalerweise nur bei *E. coli* und dient dort als Abwehrmittel zwischen verschiedenen Stämmen. Erst zusammen mit der anderen Komponente kann sie ihre zerstörerische Wirkung auch bei Staphylokokken entfalten. Dieser zweite Bestandteil ist das Pheromon AgrD1 von *S. aureus*, das eigentlich als innerartlicher Botenstoff dient. Als solcher kann es die sehr dicke Zellwand der Bakterien durchdringen und an einen bestimmten Rezeptor auf der Plasmamembran andocken; dabei zieht es seine todbringende Fracht – das Colicin Ia – quasi hinter sich her.

Um den zusammengesetzten Wirkstoff zu gewinnen, schnitten die Wissenschaftler zunächst die Gene für Colicin Ia und AgrD1 aus dem Erbgut von *E. coli* beziehungsweise *S. aureus* heraus und verketteten sie miteinander. Dann schleusten sie das kombinierte DNA-Stück wiederum in *E.-coli*-Zellen ein. So erhielten sie einen Bakterienstamm, der das künstliche Gen zusammen mit seiner eigenen Erbinformation abliest und daraufhin große Mengen des Antibiotikums synthetisiert.

In Tests mit über hundert multiresistenten *S.-aureus*-Stämmen aus chinesischen Krankenhäusern hat das Kombiprodukt, das nach seinen beiden Bestandteilen Pheromonicin getauft wurde, bereits seine Wirksamkeit bewiesen. Während herkömmliche Antibiotika wie Penicillin und Oxacillin den hartgesottenen Erregern nichts anhaben konnten, stoppte der neu entwickelte Wirkstoff ihre Vermehrung. Seine hohe Spezifität zeigte sich darin, dass er weder *Streptococcus pneumoniae* noch das eng mit *S. aureus* verwandte Bakterium *Staphylococcus epidermidis* im Wachstum hemmte.

Aber nicht nur in der Kulturschale, auch im lebenden Organismus erwies sich Pheromonicin als potente Waffe. Als George Wu und seine Kollegen Mäuse mit multiresistenten Staphylokokken infizierten, starben sämtliche unbehandelten Tiere innerhalb von drei Tagen. Dagegen überstanden alle Mäuse, denen Pheromonicin injiziert wurde, die Infektion unbeschadet. Außerdem erwies sich, dass der Wirkstoff für Säugerzellen anscheinend völlig unschädlich ist: Weder die Organe der mit Pheromonicin behandelten Mäuse noch menschliche Kul- ▷

▶ Der Eitererreger *Staphylococcus aureus* ist als Problemkeim berüchtigt. Einige Stämme sind bereits gegen die meisten Antibiotika resistent. Die neu entwickelte Kombination eines Abwehrstoffs aus dem Darmbakterium *Escherichia coli* und eines Pheromons von *S. aureus* – Prototyp einer neuen Klasse von antibakteriellen Substanzen – macht ihm jedoch gezielt und selektiv den Garaus.

▷ turzellen zeigten irgendwelche Auffälligkeiten.

Der Kampf gegen bakterielle Infektionskrankheiten gleicht einem endlosen Wettlauf, in dem es nur mit immer neuen Medikamenten gelingt, einen Vorsprung vor den Erregern zu bewahren. Gentechnisch hergestellte Substanzen nach dem Muster von Pheromonicin bieten eine gute Chance, weiterhin die Nase vorn zu behalten. Sie könnten schon bald das Mittel der Wahl zur Behandlung von Infekten sein, bei denen der angreifende Mikroorganismus bekannt ist. Durch Verknüpfung von Colicin Ia mit einem geeigneten »Schleusermolekül« für das jeweilige Ziel-Bakterium dürfte sich ein breites Sortiment hochwirksamer Antibiotika synthetisieren lassen, die eine lebensrettende Therapie beim Befall mit multiresistenten Keimen ermöglichen. Da sie äußerst spezifisch sind, könnte ihr Einsatz auch den momentanen Teufelskreis unterbrechen, bei dem harmlose Bakterien Resistenzen entwickeln und diese dann an gefährliche Krankheitserreger weitergeben. ◁

Petra Jacoby ist Diplombiologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.

NANOTECHNOLOGIE

Superkristall aus Magnet und Halbleiter

Eine neue Klasse magnetooptischer Materialien bietet faszinierende Perspektiven für die Datenspeicherung und -verarbeitung. Darin ordnen sich Nanoteilchen durch Selbstorganisation zu größeren Gebilden mit regelmäßigem Kristallgitter.

Von Joachim Eiding

Lange Zeit galten Materialien, die ferromagnetisch und halbleitend zugleich sind, als kaum zu realisieren. Aus theoretischen Gründen schienen die beiden Eigenschaften schwer miteinander vereinbar. Dafür versprach ihre Kombination in einem einzigen Werkstoff aber faszinierende neue Möglichkeiten – zum Beispiel in der so genannten Spintronik, bei der Magnetfelder für besonders schnelle elektronische Schaltungen benutzt werden sollen. Mittlerweile gibt es zwar schon einige wenige ferromagnetische Halbleiter wie Europiumoxid. Aber dieses Material ist sehr teuer und noch dazu technisch kaum verwertbar, weil es erst bei sehr tiefen Temperaturen magnetisch wird.

Nun ist es der Forschergruppe um Christopher B. Murray an den IBM-Forschungslabors in Yorktown Heights (New York) erstmals gelungen, winzige Teilchen aus magnetischem Eisenoxid und halbleitendem Bleiselenid in einem regelmäßigen dreidimensionalen Gitter anzuordnen *(Nature, Bd. 423, S. 968)*. Voraussetzung für die Herstellung eines solchen »Metamaterials« war, dass die Partikel jeweils einen einheitlichen Durchmesser von wenigen Nanometern hatten. Das ließ sich mit speziellen Herstellungsverfahren erreichen.

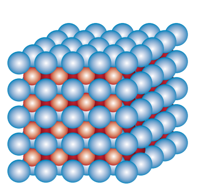
Bei ihren Experimenten kochten die Wissenschaftler jeweils ein Gemisch der beiden Teilchensorten in einem organischen Lösungsmittel acht Stunden lang auf. Beim anschließenden Eindampfen schieden sich »Superkristalle« aus, in denen die Eisenoxid- und Bleiselenid-Partikel wie bei einer chemischen Verbindung in einem stöchiometrischen Verhältnis vorlagen und genau definierte Plätze einnahmen (Bild).

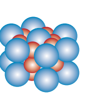
Um wirklich regelmäßige Kristallgitter zu erhalten, optimierte die Forschergruppe in mehreren Versuchen einige Randbedingungen. So variierte sie das Verhältnis des Durchmessers der Bleiselenid- und Eisenoxid-Teilchen zwischen 0,4 und 0,7. Das beste Ergebnis lieferte ein Wert von 0,55. Als günstigstes Lösungsmittel erwies sich Dibutylether – ein Verwandter des für Narkosezwecke verwendeten Diethylethers.

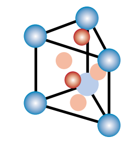
Entscheidend für die Qualität und Art der Superkristalle war auch das Mengenverhältnis der beiden Bestandteile im Ausgangsgemisch. Die IBM-Forscher variierten es in weiten Grenzen und erhielten so drei verschiedene Metamaterialien, in denen Eisenoxid und Bleiselenid im Verhältnis 1:13, 1:5 und 1:2 vorlagen. Optimal war jeweils ein deutlicher Überschuss der halbleitenden Partikel.

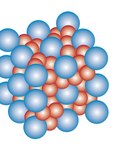
Unter diesen Bedingungen fügten sich die Bestandteile spontan – durch Selbstorganisation – zu den Superkristallen zusammen. Deren genauer Aufbau ließ sich im Elektronenmikroskop erkennen. So bildeten bei Kristallen vom Typ AB_{13} die Eisenoxid-Teilchen Würfel, in deren Mittel Ikosaeder aus zwölf Bleiselenid-Partikeln saßen, die jeweils ein weiteres Bleiselenid-Teilchen im Zentrum enthielten.

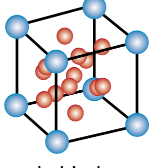
Die beiden anderen Metamaterialien waren hexagonal. Beim AB_5-Typ bildeten die Bleiselenid-Partikel trigonale Prismen, auf deren fünf Seiten jeweils im Zentrum ein Eisenoxid-Teilchen saß. ▷











Obwohl zwischen den Nanoteilchen aus Bleiselenid und Eisenoxid keinerlei Bindungskräfte wirken, können sie sich durch Selbstorganisation in drei verschiedenen Gittern mit konstanten, stöchiometrischen Mengenverhältnissen anordnen. Die Geometrie dieser »Superkristalle« ist hier veranschaulicht.

▷ Beim AB_2-Typ schließlich waren die Rollen der beiden Komponenten vertauscht. Hier erzeugten die Eisenoxid-Partikel das trigonale Prisma, und in seinem Inneren befand sich jeweils ein Bleiselenid-Teilchen.

Allein die Herstellung solcher Superkristalle ist bereits ein großer Erfolg. Auf dem Weg zu funktionierenden spintronischen Schaltkreisen bedeutet sie allerdings nur einen ersten, grundlegenden Schritt. Bis zum Ziel sind noch viele weitere Hürden zu überwinden.

Immerhin aber hat auch das jetzt fabrizierte Zwittermaterial aus Magnet und Halbleiter bereits interessante Eigenschaften. So bilden die isoliert vorliegenden Bleiselenid-Teilchen – vor allem beim AB_2-Typ – so genannte Quantenpunkte. Das sind praktisch ausdehnungslose, »nulldimensionale« Fallen für Elektronen. Je nachdem ob sie leer oder voll sind, können sie eine binäre 0 oder 1 repräsentieren. Möglicherweise lässt sich über die umgebenden magnetischen Teilchen die Be- und Entladung, also der elektronische Schaltvorgang, steuern.

Modulare Montage von Werkstoffen

Nun haben Quantenpunkte aus 200 bis maximal 10 000 Atomen aber eine weitere ungewöhnliche Eigenschaft, die aufregende Perspektiven für optoelektronische Anwendungen eröffnet. Wegen des beengten Raums bleiben die eingesperrten Elektronen auf eine Serie diskreter Energieniveaus beschränkt – während sie in Metallen und Halbleitern breite Bänder zur Verfügung haben. Durch Anregung mit Licht geeigneter Wellenlänge lassen sie sich auf ein höheres Niveau anheben und senden beim Zurückfallen in den Ausgangszustand wieder elektromagnetische Strahlung einer bestimmten Frequenz aus. Die Energie des Übergangs hängt dabei von der Größe der Quantenpunkte, ihrer Form und relativen Anordnung im Gitter ab – eine Vielzahl von Parametern also, mit denen sich spielen lässt.

Dabei liefern im Fall der neu hergestellten Superkristalle die magnetischen Eisenoxid-Teilchen eine weitere Stellschraube. Mit ihrem Magnetfeld sollten sie die vorhandenen Niveaus noch einmal aufspalten – Physiker sprechen vom Zeeman-Effekt. Die Folge sind neue optische Übergänge, die mit der Stärke des Magnetfeldes variieren. Allerdings ließ sich das Phänomen bei den Superkristallen bisher noch nicht nachweisen. »Wir hoffen sehr, die Zeeman-Aufspaltung durch die Eisenoxid-Nanopartikel sehen und messen zu können«, meint Murray.

»Der Effekt wäre für die Entwicklung der Nanotechnologie schon sehr hilfreich«, urteilt der Festkörperphysiker und Magnetooptik-Experte Josef Zweck von der Universität Regensburg. Ein magnetisches und ein halbleitendes Partikelchen könnten zusammen einen neuartigen Typ von Speicherzelle bilden. Dabei würde die Magnetisierung des Eisenoxid-Teilchens die Aufspaltung des Quantenpunktes steuern. Mit einem Laser ließe sich dann das Ausmaß des Effektes ermitteln und so feststellen, ob ein starkes oder ein schwaches Magnetfeld vorliegt, was wiederum als binäre 1 oder 0 interpretiert werden könnte. »Ob die Eisenoxid-Kriställchen die Quantenpunkte allerdings wirklich genügend aufspalten, bleibt abzuwarten«, schränkt der Festkörperphysiker aus Regensburg ein.

Aber unabhängig davon bietet die Herstellung von Superkristallen aus verschiedenartigen Nanopartikeln generell viel versprechende Möglichkeiten. »Am meisten fasziniert uns, dass sich mit dieser Methode der modularen Montage beliebige Materialien zusammenbauen lassen«, erklärt Murray. Folglich basteln er und seine Forscherkollegen bei IBM neben dem Eisenoxid-Bleiselenid-System an vielen weiteren Superkristallen, wobei alle möglichen Kombinationen bekannter Nanopartikel untersucht werden. »Wir wollen ein breites Sortiment von Metamaterialien in der Pipeline haben. Benötigen unsere Entwickler dann neue technische Möglichkeiten, können sie darauf zurückgreifen«, beschreibt Murray die Strategie des Unternehmens.

Eine Besonderheit von Superkristallen ist auch, dass sie bei bestimmten Wellenlängen über einen negativen Brechungsindex verfügen und entsprechende Strahlung folglich im Vergleich mit normalen Materialien wie Glas zur anderen Seite hin brechen. Bisher ließen sich nur Werkstoffe herstellen, die diesen Effekt im Mikrowellenbereich zeigen. Mit Metamaterialien aus Nanoteilchen hoffen die Festkörperphysiker nun die dafür verantwortlichen elektronischen Übergänge in den optischen Spektralbereich verschieben zu können. Das bringt Mihail Roco von der National Science Foundation der USA zum Schwärmen: »Diese Ergebnisse zeigen einen Weg auf, wie die Nanotechnologie eine kommende industrielle Revolution einleiten könnte«, urteilt er enthusiastisch. ◁

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.

BIOMECHANIK

Muskelmotor im Rückwärtsgang

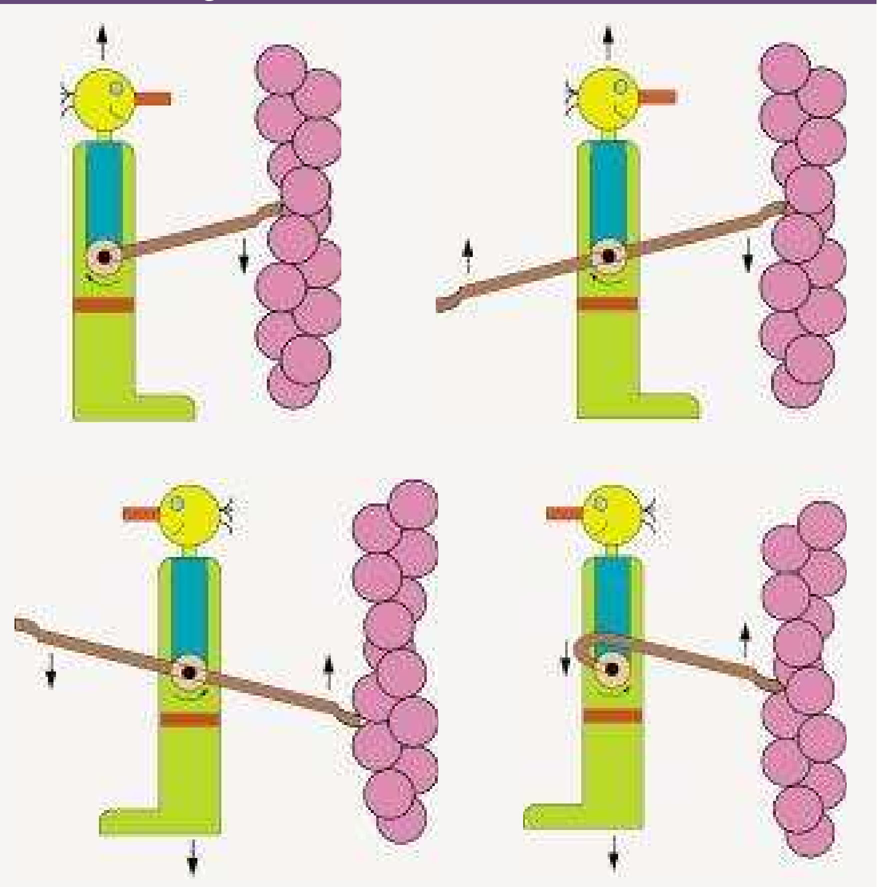
Wissenschaftler in Hannover haben erstmals einem Myosinmolekül beigebracht, sich entgegen seiner normalen Richtung zu bewegen.

Von Michael Groß

Wer einen Finger streckt, macht sich wohl kaum klar, welche komplizierte molekulare Maschinerie er dabei in Gang setzt. Als Motor der Bewegung fungiert das faserige Protein Myosin, das mit seinem langen Schwanz in den so genannten dicken Filamenten verankert ist. Deren Verschiebung gegenüber den parallel angeordneten dünnen Filamenten aus Actin bewirkt die Muskelkontraktion. Vereinfacht gesagt, streckt sich das freie Ende des Myosins lang aus, ergreift die Actinfaser und zieht sie mit einer Schwenkbewegung ein Stück an sich vorbei.

Neue Methoden zur Untersuchung von Einzelmolekülen – etwa mit optischen Pinzetten – erbrachten im letzten Jahrzehnt eine Fülle neuer Erkenntnisse über den genauen Ablauf dieses Vorgangs. So ließ sich die Schrittweite und die Kraftübertragung bei jedem einzelnen Zug ermitteln. Um die molekularen Hintergründe im Detail zu erforschen, ersetzte die Arbeitsgruppe von Dietmar Manstein an der Medizinischen Hochschule Hannover per Genmanipulation den natürlichen Hebelarm des Myosins durch diverse künstliche Konstrukte und prüfte, wie sich das auf die Kontraktion auswirkte. Generell verschlechterte sich dabei die Effizienz des Motors – was ein-

Überlistung des Klettermännchens



Ein stilisierter Klettermaxe kann sich an einem Seil hochhangeln, indem er einen Greifarm von oben nach unten schwenkt (oben links). Eine Verlängerung des Arms über den Körper des Roboters hinaus bewegt sich bei derselben Drehung allerdings von unten nach oben (oben rechts). Wendet der Klettermaxe dem Seil den Rücken zu und packt er es mit dem hinteren Ende der Verlängerung, kehrt sich seine Bewegungsrichtung um (unten links). Auch wenn der ursprüngliche Greifarm nach hinten gebogen wurde, bewegt sich der Roboter, sobald er die übliche Drehbewegung macht, nach unten (unten rechts).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

mal mehr zeigt, dass sich die Natur nicht so leicht übertreffen lässt.

Nun ist den Hannoveraner Forschern jedoch ein Kunststück gelungen, mit dem sie der Natur ein Schnippchen schlagen: Sie konnten dem Molekülmotor einen Rückwärtsgang verpassen *(Nature, Bd. 427, S. 558)*. Allerdings geschah das nicht dadurch, dass sie einfach die Richtung der Drehbewegung umkehrten – in der Hinsicht bleibt das Myosin stur. Der Erfolg beruht vielmehr auf einem raffiniert konstruierten künstlichen Hebelarm.

Um den Trick zu verstehen, wollen wir das Actin als Seil betrachten und das Myosin als einfachen mechanischen Klettermaxen (Bild). Der packt das Tau über seinem Kopf mit einem Hebelarm, schwenkt diesen nach unten und zieht sich dabei hoch. Als Nächstes stellen wir uns vor, der Arm werde nach hinten über den Körper hinaus verlängert. Wenn ihn der Klettermaxe dann wie gewöhnlich von oben nach unten dreht, bewegt sich die Verlängerung in der umgekehrten Richtung: von unten nach oben. Als Letztes soll unser Roboter nun dem Seil den Rücken zukehren und es mit dem hinten neu angefügten Stück anfassen. Wenn er jetzt mit dem Hebelarm die übliche Drehung macht, bewegt er sich plötzlich abwärts.

Dies war die Grundidee von Manstein und Mitarbeitern. Aus praktischen Erwägungen sah die Realisierung allerdings etwas anders aus. Statt den Hebelarm nach hinten zu verlängern, setz- ▷

▷ ten die Forscher eine Art U-Rohr zwischen ihn und das Myosin, sodass er nicht mehr gerade nach vorn herausragte, sondern eine 180-Grad-Kurve machte und dann nach hinten zeigte. Die Wirkung war letztlich dieselbe: Das Ende des umgebogenen Arms schwenkte von unten nach oben, wenn das Myosin das U-Rohr von oben nach unten drehte.

Soweit die Theorie. Aber würde sie auch von der Praxis bestätigt? Um die Bewegungsrichtung festzustellen, nutzten die Forscher die Tatsache, dass die beiden Enden der Actin-Filamente chemisch unterscheidbar sind. Das eine bezeichnet man deshalb gewöhnlich mit einem »+« und das andere mit einem »–«. Manstein und Mitarbeiter markierten nun das Minus-Ende mit einer grün und die restliche Faser mit einer rot fluoreszierenden Verbindung. Natürliches Myosin hangelt sich auf das Plus-Ende zu. Die Variante mit dem Rückwärtsgang sollte also in Richtung Minus-Ende wandern.

Tüftelei mit Nutzwert

An dieser Stelle wendeten die Forscher erneut einen kleinen, altbewährten Trick an: Statt die Bewegung des Myosins zu verfolgen, was schwierig gewesen wäre, fixierten sie es an einem Glasplättchen und beobachteten statt dessen die Wanderung der leuchtenden Actin-Stränge. Aus dem Klettermaxen wurde so quasi ein Glöckner, der am Boden stehen bleibt und nur am Strang zieht, statt sich daran hochzuhangeln.

Zunächst betrachteten Manstein und Mitarbeiter den Normalfall. Wenn natürliches Myosin auf das Plus-Ende zustrebt, sollte es nach seiner Fixierung den Actin-Strang in Richtung Minus-Ende zerren. Genau das war im Fluoreszenz-Mikroskop zu beobachten: Der grün leuchtende Kopf führte die Bewegung der roten Schlange an.

Danach testeten die Wissenschaftler das Myosin mit dem geraden künstlichen Hebelarm. Wie erwartet, kroch der Lindwurm immer noch mit dem grünen Kopf voran – allerdings nur ungefähr ein Zehntel so schnell. Schließlich kam der spannende Moment, in dem Manstein und Mitarbeiter ihr Konstrukt mit dem um 180 Grad gebogenen Hebelarm ins Rennen schickten. Und sie wurden nicht enttäuscht: Tatsächlich kehrte sich die Bewegungsrichtung um – das grün markierte Minus-Ende bildete plötzlich das Schlusslicht der mikroskopisch kleinen Eisenbahn. Dabei legte das Actin im Durchschnitt 700 Mikrometer pro Sekunde zurück. Es war mithin deutlich langsamer als im Fall von normalem Myosin im Vorwärtsgang, aber ungefähr genauso schnell wie bei der künstlichen Variante mit dem geraden Hebelarm.

Nun ist diese molekulare Tüftelei durchaus faszinierend, aber hat sie auch einen Nutzwert? Während die heutigen mikroanalytischen und -synthetischen Verfahren noch Billiarden identischer Moleküle benötigen, geht die Entwick-

NACHGEHAKT

Wissenschaft – bleibt die Dritte Welt ausgeschlossen?

Wissen ist für alle da. Im freien Gedankenaustausch gedeiht die Wissenschaft, dieser strahlende Widerpart von Geheimnistuerei und dumpfem Aberglauben. Die prompte technische Anwendung ihrer Erkenntnisse ermöglicht weltweit eine bessere Nutzung natürlicher Ressourcen, gewährleistet die Ernährung einer schnell wachsenden Bevölkerung, liefert die Grundlage für eine menschenwürdige Existenz.

Schön wär's. Der kürzlich publizierte Uno-Bericht »Inventing a Better Future: A Strategy for Building Worldwide Capacities in Science and Technology« zeigt einen alarmierenden Trend zur immer krasseren Aufteilung der Welt in wissenschaftlich-technisch privilegierte und benachteiligte Zonen (www.interacademycouncil.net/streport). Hinter dieser Entglobalisierung des Wissens steckt der bekannte Teufelskreis von Armut und Unterentwicklung.

Das reichste Fünftel der Weltbevölkerung verdient 70-mal so viel wie das ärmste, die Hälfte der Menschen muss von weniger als zwei Dollar pro Tag leben. In den Elendsregionen explodiert die Bevölkerung, ein Heer junger Arbeitssuchender drängt vom Land in verslumte Megastädte. Dort bleiben sie vom Wissensaustausch mit dem Rest der Welt mangels Telefon und Internet praktisch abgeschnitten. Eine negative Auslese kommt in Gang: Gerade die Begabtesten kehren ihrem

lung hin zur gezielten Manipulation von Einzelmolekülen. Die Zelle schafft das schon längst. So kann sie die Information einer einzelnen DNA-Doppelhelix auslesen, während selbst der modernste Sequenzierautomat von diesem Ziel noch um Größenordnungen entfernt ist. Um es zu erreichen, braucht die Nanotechnologie molekulare Werkzeuge.

Die Arbeiten der Hannoveraner Forscher haben gezeigt, dass sich die Wanderungsrichtung und -geschwindigkeit von Myosin mit künstlichen Hebelarmen gezielt modifizieren lässt. Im nächsten Schritt sollte es also gelingen, Molekülmotoren mit mehreren Vorwärts- und Rückwärtsgängen zu konstruieren. Mit modernen Mikroarray-Techniken könnte man dann zum Beispiel eine Oberfläche herstellen, auf der Actin-Fasern in definierten Bereichen mit vorherbestimmten Geschwindigkeiten in verschiedene Richtungen wandern. Das wäre etwas, nach dem sich Nanotechnologen die Finger lecken. ◁

Michael Groß ist Biochemiker und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

Land den Rücken und streben in die wissenschaftlich-technischen Zentren der Industrieländer.

Diese Skizze eines globalen Verelendungsszenarios unterschlägt sogar noch weitere Beschleunigungsfaktoren wie Hungersnöte und Epidemien: In manchen Regionen Schwarzafrikas hat Aids große Teile der erwachsenen Bevölkerung ausgerottet, und aus den Massen der Waisen kann von selbst niemals ein Bildungsmilieu für künftige Ärzte, Lehrer oder Techniker hervorgehen. Durch ein dichtes Gestrüpp verhängnisvoller Kausalketten wird ein rasch wachsender Teil der Erdbevölkerung von allem fern gehalten, was den Menschen durch Wissenserwerb und eigene Forschung einen Ausweg aus ihrem Elend weisen könnte.

In einem Editorial für »Science« vom 13. Februar hat Uno-Generalsekretär Kofi Annan unter dem Titel »Science for All Nations« den reichen Industrieländern ins Gewissen geredet, dieser Entwicklung nicht tatenlos zuzusehen – schon in ihrem eigenen Interesse. Weder Seuchen noch globale Umweltschäden respektieren Landesgrenzen, ganz zu schweigen vom internationalen Terrorismus, der nur in einem Milieu von Armut, Unterprivilegiertheit und Unwissen seine Sympathisanten rekrutieren kann. Annan schlägt vor, in den nächsten fünf bis zehn Jahren in Entwicklungsländern zwanzig nationale oder regionale »Centers of Excellence« auszuwählen und sie gezielt aus den Mitteln von zwei noch zu gründenden »Global Funds« zu fördern; das Geld sollen Regierungen, Stiftungen und internationale Organisationen zur Verfügung stellen.

Utopisch sind diese Vorschläge nicht. Es gibt bereits private Stiftungen, die Hervorragendes leisten, aber ihnen fehlen umfassende Daten über die intellektuellen Ressourcen in Entwicklungs- und Schwellenländern. Auch müssten Kontrollinstanzen dafür sorgen, dass Forschungsgelder nicht – wie insbesondere in Afrika leider häufig – in den Taschen korrupter Politiker und Universitätsbeamter verschwinden. Und last but not least – so ein »Nature«-Kommentar vom 12. Februar – sollten die besten Forschungszentren in Entwicklungsländern Breitband-Internetanschlüsse über Satellit bekommen. Die wenigen Labors in Afrika, die dieses Privileg bereits genießen, profitieren nicht nur vom regen Austausch mit der weltweiten Scientific Community, sondern auch von der Möglichkeit, sich in den reicheren Ländern ebenso flink um Forschungsgelder zu bewerben wie ihre Konkurrenten, die näher an den Trögen wohnen.

Unsere Politiker reden gern von Innovation, Wissensgesellschaft und Globalisierung. Bei all den großen Worten sollten wir aber nicht vergessen, dass eine Welt, in der die meisten Menschen in Elend und Unwissenheit versinken, auf Dauer auch für uns nicht wünschenswert sein kann.

Michael Springer



Der Autor ist ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

INTERVIEW

»Bürokratische statt vernünftiger Regelungen«

Das Deutsche Arzneimittelgesetz (AMG) wird diesen Monat novelliert. Grund ist eine EU-Direktive zur Harmonisierung von Forschung und Entwicklung in Europa. Michael Herschel, Vorsitzender der Deutschen Gesellschaft für Pharmazeutische Medizin, befürchtet Schaden für die klinische Forschung in Deutschland.


Michael Herschel

Spektrum der Wissenschaft: Herr Dr. Herschel, worin bestehen die wichtigsten neuen Regelungen?

Dr. Michael Herschel: Wer bislang eine Studie plante, ging zur Ethikkommission. Hatte die keine Bedenken, reichte man alle Unterlagen beim Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte zur Kenntnisnahme ein und konnte nach ein bis zwei Wochen beginnen – ohne weitere Genehmigungsprozedur. Jetzt darf die Ethikkommission sechzig Tage prüfen und zusätzlich das Bundesinstitut noch einmal dreißig Tage. Bei biologischen Substanzen wie Impfstoffen verlängert sich die letztgenannte Frist sogar auf sechzig Tage, und bei gentherapeutischen Studien gibt es gar keinen festgesetzen Zeitrahmen; da kann sich die Prüfung ins Unendliche ziehen.

Spektrum: Dreißig bis sechzig Tage klingt aber nicht so dramatisch.

Herschel: Sicher nicht für Studien an einem einzelnen Institut. Aber oft kommt man nur dann in vernünftiger Zeit zu ausreichend Patienten, wenn sich mehrere Kliniken zusammentun. In Deutschland ist die Ethikprüfung Ländersache. Bei multizentrischen Studien dürfen daher künftig die Kommissionen mehrerer Länder mitreden. Das aber macht das Verfahren äußerst kompliziert und Zeit raubend. Zentralstaaten haben dieses Problem nicht. Aber auch Deutschland hätte den Interpretationsspielraum der EU-Direktive nutzen oder alte Regelungen rechtzeitig reformieren können. Andere Länder waren da geschickter.

Spektrum: Welche zum Beispiel?

Herschel: Die Niederlande haben bundeseinheitliche Ethikkommissionen eingeführt. Und in Österreich wurde der Arzneimittelbeirat ermächtigt, das Votum der Ethikkommission im Zweifelsfall zu überstimmen. In Deutschland hatte das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte bisher die gleiche Befugnis; doch die wurde ihm jetzt genommen.

Spektrum: Sind auch Studien mit eingeführten Präparaten betroffen?

Herschel: Ja. Bei einer neuen Kombination eingeführter Präparate verlangt die Behörde jetzt, deren Wechselwirkungen vorab im Detail zu klären. Eine solche zusätzliche Kombinationstoxikologie wird niemand finanzieren wollen.

Spektrum: Aber dienen solche Verschärfungen des Prüfverfahrens nicht dem Schutz der Studienteilnehmer?

Herschel: Nur auf den ersten Blick. Obwohl die bisherige deutsche Lösung relativ unbürokratisch war, traten nicht mehr Zwischenfälle auf als etwa in England, wo es schon immer ein sehr strenges Prüfverfahren gab – worunter die klinischen Studien dort erheblich litten. Leider nutzte man die AMG-Novelle in Deutschland nicht, um endlich ein paar alte Zöpfe abzuschneiden.

Spektrum: Welche?

Herschel: Die Ethikkommission erhält nach wie vor Listen über Zwischenfälle, um eine laufende Studie gegebenenfalls abzubrechen. Diese pauschalen Angaben sind aber nur bedingt aussagekräftig, weil sicher nicht jeder Todesfall mit dem getesteten Medikament zusammenhängt. Gemeldet wird ja auch, wenn jemand nur von einer Leiter gefallen ist. Hilfreich wäre hier, vorab in Studien mit Placebo abzuschätzen, was alles ohne Wirkstoff passieren kann.

Spektrum: Was bedeuten die Veränderungen nun im Klartext für die klinische Forschung in Deutschland?

Herschel: Es wird weniger Studien in der frühen, kritischen Phase geben, in der entscheidende wissenschaftliche Ergebnisse entstehen. Wenn sich die Wartezeiten drastisch verlängern, wandert die Pharmazeutische Industrie noch mehr in andere Länder ab.

Spektrum: Und die Universitätsforschung?

Herschel: Da wird's richtig dramatisch. Die Universitäten sind dem Mehraufwand bei der Prüfung und beim Überwachen der Studien nicht gewachsen – weder von der Infrastruktur noch finanziell. Am Klinikum Rechts der Isar in München rechnet man zum Beispiel mit einem Rückgang um mehr als die Hälfte. Das wäre schon drastisch.

Spektrum: Der Standort Deutschland katapultiert sich selbst ins Abseits?

Herschel: Wir waren bisher in einer hervorragenden Position und spielten bei der Arzneimittelentwicklung ganz vorne mit. Diese Stellung ist mit den neuen Gesetzen nicht zu halten. Aber auch andere europäische Länder sind betroffen. Die Irische Gesellschaft für Onkologie hat schon angekündigt, dass sie kaum noch Studien machen kann. Darüber freuen sich nur die Amerikaner.

Spektrum: Was kann man tun?

Herschel: Das Gesundheitsministerium hat die jetzige Novelle kurzfristig mit heißer Nadel gestrickt und muss sie nun im Hauruckverfahren verabschieden, um die von der EU gesetzten Fristen einzuhalten. An dieser Fassung wird sich also kaum noch etwas ändern lassen. Doch sie darf nicht das letzte Wort bleiben. Die Gesellschaft für Pharmazeutische Medizin fordert, die Fristen der einzelnen Kommissionen um etwa die Hälfte zu verkürzen. Außerdem wollen wir ein zentrales, bundes- oder sogar europaweites Prüfverfahren. Das wäre für gesamteuropäische Studien wichtig. Und schließlich brauchen wir klare Regelungen zum besseren Schutz der Patienten – also etwa Risikobewertungen, die von externen Expertenteams durchgeführt und den Ethikkommissionen vorgelegt werden. Nur so bleibt die klinische Forschung in Deutschland auch auf lange Sicht konkurrenzfähig.

Das Interview führte **Stefanie Reinberger.**



Der kesselartige Gipfelkrater des Vulkans Olympus Mons ist stellenweise drei Kilometer tief. Der Vulkan selbst (rechts) ist der größte im Sonnensystem und dreimal so hoch wie der Mount Everest.

ESA / D. DUCROS

Mars im Fokus

Sensationelle Bilder und Daten vom Roten Planeten – die Messungen der Nasa-Rover und der europäischen Sonde Mars Express faszinieren nicht nur die Wissenschaftler.

Von Uwe Reichert

Zwischen Erfolg und Misserfolg liegt häufig ein sehr schmaler Grat – der oft durch den Zufall mitbestimmt wird. Das gilt insbesondere für Raumfahrtunternehmen. Während die Landeeinheit Beagle 2, die im Dezember 2003 auf dem Mars niedergehen sollte, verschollen blieb und die pannengeplagte Sonde Nozomi am Roten Planeten vorbeischwirrte, können sich die Forscher, die an der Sonde Mars Express und an der Mars-Exploration-Rover-Mission mit den beiden autarken Fahrzeugen Spirit und Opportunity beteiligt sind, umso mehr über sensationelle Daten freuen.

Den Nasa-Rovern gelang eine Bilderbuchlandung. Spirit ging wie vorgesehen inmitten des Kraters Gusev nieder, etwa 15 Grad südlich des Marsäquators. Die Wände des Einschlagkraters begrenzten vermutlich in der Frühzeit des Planeten einen See von der Größe Hessens. Deshalb hoffen die Wissenschaftler, dort Ablagerungen dieses Gewässers zu finden.


USGS / NASA

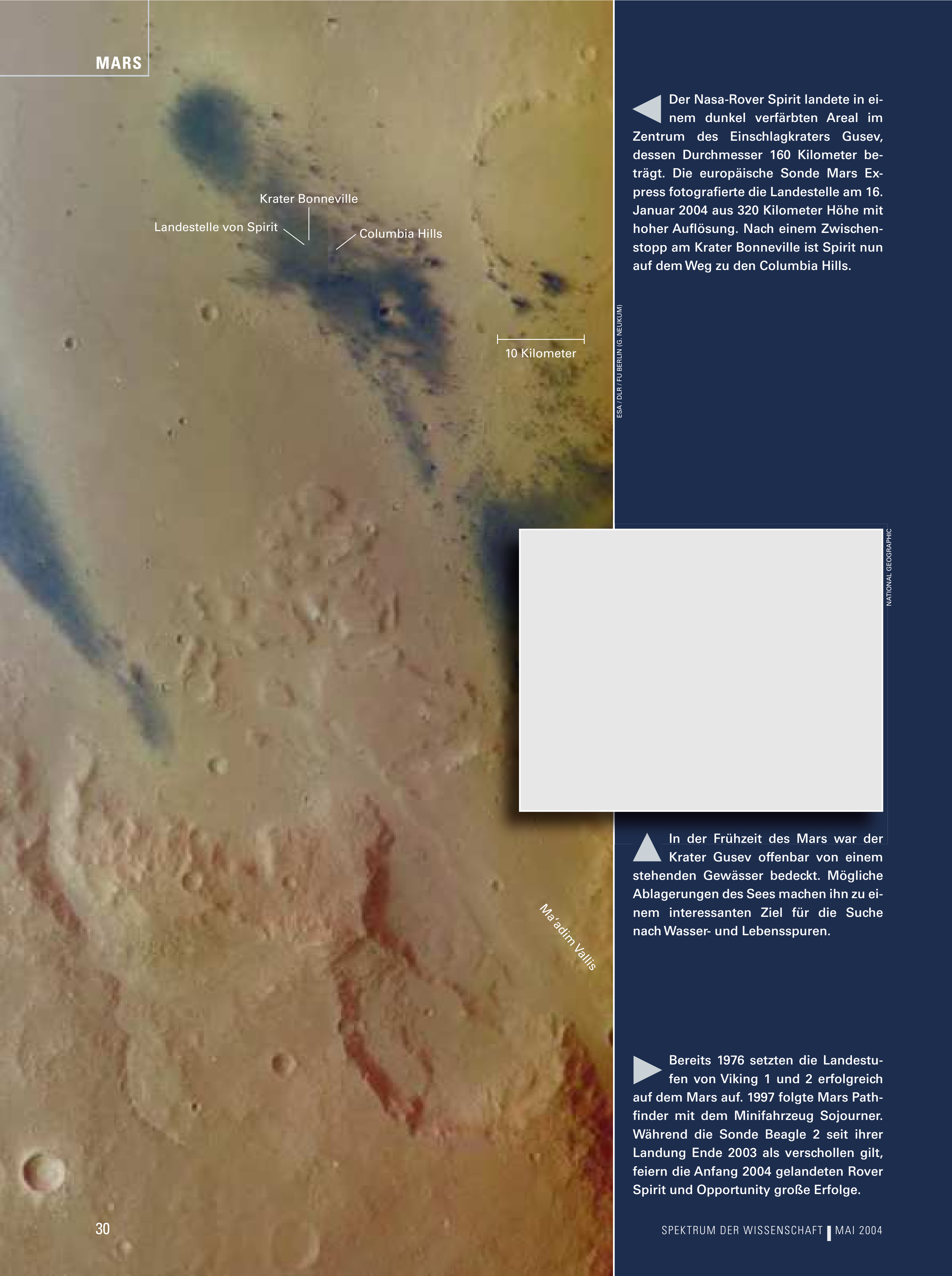
Das Zwillingsfahrzeug Opportunity ging in der Ebene Meridiani Planum nieder, wo es früheren Fernerkundungsdaten zufolge Hämatit geben sollte, ein Eisenerz, das sich dort durch chemische Ausfällung in Wasser gebildet haben könnte. Bei der Landung kullerte der durch Prallsäcke geschützte Rover in einen kleinen Krater mit rund 20 Meter Durchmesser – wie ein Golfball, perfekt eingelocht nach einem 480 Millionen Kilometer langen Flug. Dies erwies sich als Glücksfall, denn nach Inbetriebnahme des Robotergeologen präsentierte sich seinen Messgeräten an der Innenwand des Kraters der Aufschluss einer Gesteinsformation. Für so interessant erachteten die menschlichen Kollegen auf der Erde dieses Areal, dass sie Opportunity zwei Monate lang seine Messungen in diesem Krater durchführen ließen, den sie »Eagle« nannten. Erst am 57. Marstag – an Sol 57, wie die Astronomen sagen – kletterte Opportunity über den Kraterrand und begann, seine weitere Umgebung zu erkunden.

Beide Rover enthalten Messgeräte, die in Mainz entwickelt wurden: das Mößbauer-Spektrometer Mimos II (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/2003, S. 75) und das Alpha-Röntgen-Spektrometer APXS (siehe S. 36). Gleich die ersten von diesen Instrumenten registrierten Spektren lieferten Hinweise auf eine feuchte Vergangenheit des Mars: Mimos II entdeckte das Mineral Jarosit, das auf der Erde nur in wässriger Umgebung entsteht, während APXS Sedimentgesteine mit Eisensulfat nachwies, bei deren Bildung viel Wasser vorhanden gewesen sein muss.

Während die beiden Rover ihre Mission fortsetzen – wozu sie rein technisch und energetisch mehrere hundert Tage in der Lage wären –, erkundet Mars Express von der Umlaufbahn aus den Roten Planeten. Furore machen hierbei besonders die hoch aufgelösten Stereobilder der High Resolution Stereo Camera (siehe S. 35), welche die Oberflächenformationen wahlweise in der Aufsicht oder perspektivisch darstellen können. Auf diesen und den folgenden Seiten sind einige dieser Fotos abgebildet. ◁

Uwe Reichert

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

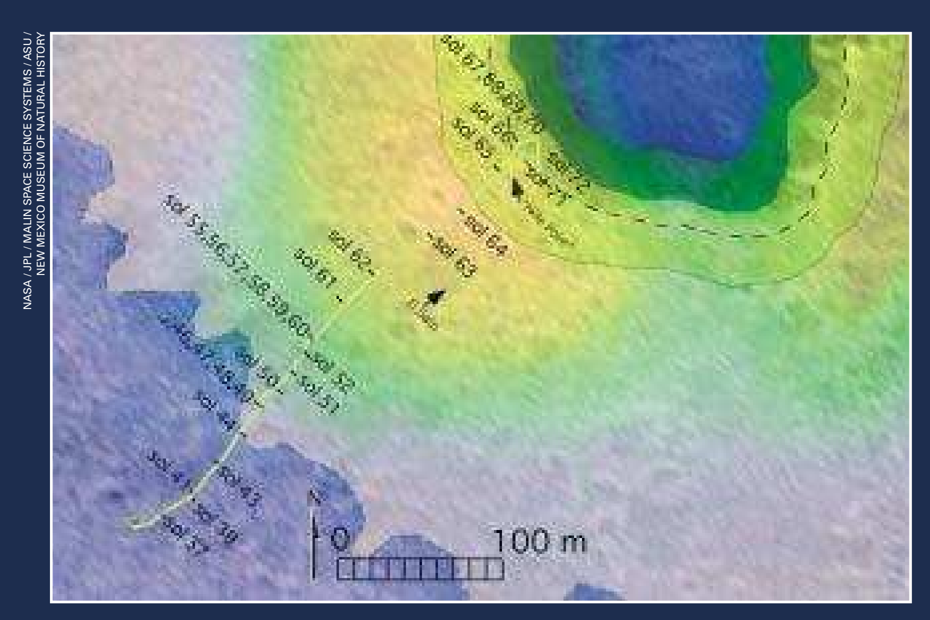


◀ Der Nasa-Rover Spirit landete in einem dunkel verfärbten Areal im Zentrum des Einschlagkraters Gusev, dessen Durchmesser 160 Kilometer beträgt. Die europäische Sonde Mars Express fotografierte die Landestelle am 16. Januar 2004 aus 320 Kilometer Höhe mit hoher Auflösung. Nach einem Zwischenstopp am Krater Bonneville ist Spirit nun auf dem Weg zu den Columbia Hills.

▲ In der Frühzeit des Mars war der Krater Gusev offenbar von einem stehenden Gewässer bedeckt. Mögliche Ablagerungen des Sees machen ihn zu einem interessanten Ziel für die Suche nach Wasser- und Lebensspuren.

▶ Bereits 1976 setzten die Landestufen von Viking 1 und 2 erfolgreich auf dem Mars auf. 1997 folgte Mars Pathfinder mit dem Minifahrzeug Sojourner. Während die Sonde Beagle 2 seit ihrer Landung Ende 2003 als verschollen gilt, feiern die Anfang 2004 gelandeten Rover Spirit und Opportunity große Erfolge.

NASA / JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS / ASU / NEW MEXICO MUSEUM OF NATURAL HISTORY



Der Rover Spirit erreichte am 16. März 2004 – dem 72. Tag seines Aufenthalts auf dem Mars, kurz Sol 72 genannt, den Rand des Kraters Bonneville.

KEES VEENENBOS

Das stark zerklüftete Terrain in der Umgebung des Kraters Gusev deutet auf eine alte Landschaft hin. In den Krater mündet von rechts der 900 Kilometer lange Kanal Ma'adim Vallis (künstlerische Darstellung).

Heute ist fast das gesamte Wasser auf dem Mars in den Polkappen gebunden (gemeinsam mit gefrorenem Kohlendioxid).

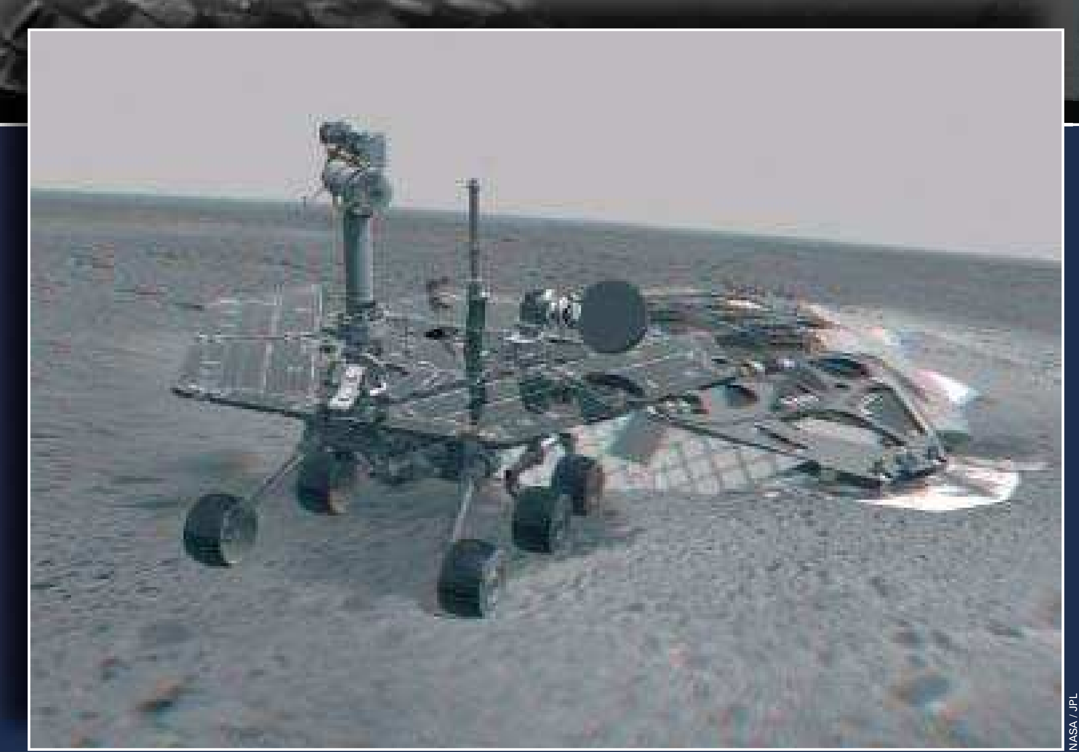
MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON CALVIN J. HAMILTON

NASA PLANETARY DATA SYSTEM

Viking 1 (Chryse Planitia)
Mars Pathfinder (Ares Vallis)
Opportunity (Meridiani Planum)
Viking 2 (Utopia Planitia)
Beagle 2 (Isidis Planitia)
Spirit (Gusev Krater)

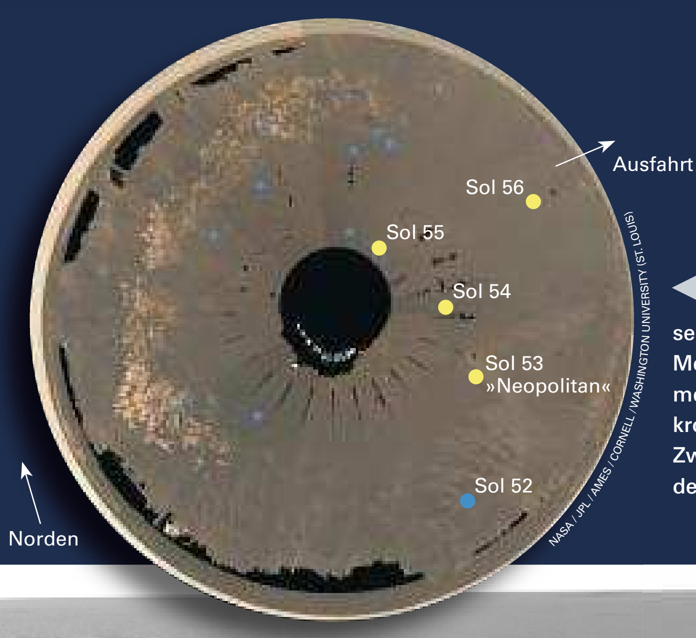
Panoramaansicht des 22 Meter breiten Kraters Eagle, in dem Opportunity landete. In der Bildmitte ist die Landeplattform zu sehen.

NASA / JPL / CORNELL



Der Rover Spirit rollt von seiner Landeplattform. Betrachtet man das 3-D-Bild mit einer Rot-Grün-Brille, entsteht der Eindruck, man stünde auf dem Mars. Die Fotomontage kombiniert ein reales Oberflächenbild mit einem Computermodell des Rovers.

NASA / JPL



Optimal getroffen: Im Krater Eagle (hier aus der Vogelperspektive gesehen) präsentierte sich Opportunitys Messgeräten ein Gesteinsaufschluss. An mehreren Stellen wurde der Boden mikroskopisch untersucht (blau). Die letzten Zwischenstopps vor der Ausfahrt aus dem Krater an Sol 57 sind gelb markiert.

NASA / JPL

Nach zwei Monaten Aufenthalt im Krater Eagle bricht Opportunity zu neuen Zielen auf. In dieser Rundumsicht sind Erosionsspuren zu sehen. War Meridiani Planum einst der Boden eines Salzsees?



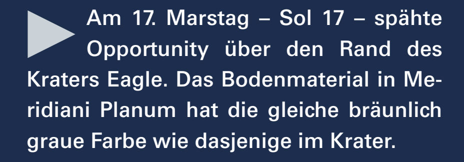
NASA / JPL / CORNELL / USGS

Diese Mikroskopaufnahme der runden Körner lieferte einen weiteren Beleg für ihren Ursprung in feuchter Umgebung. Drei Körner haben sich in einer Reihe zusammengelagert, was unwahrscheinlich wäre, wenn sie sich durch vulkanische Prozesse oder bei einem Meteoriteneinschlag gebildet hätten.

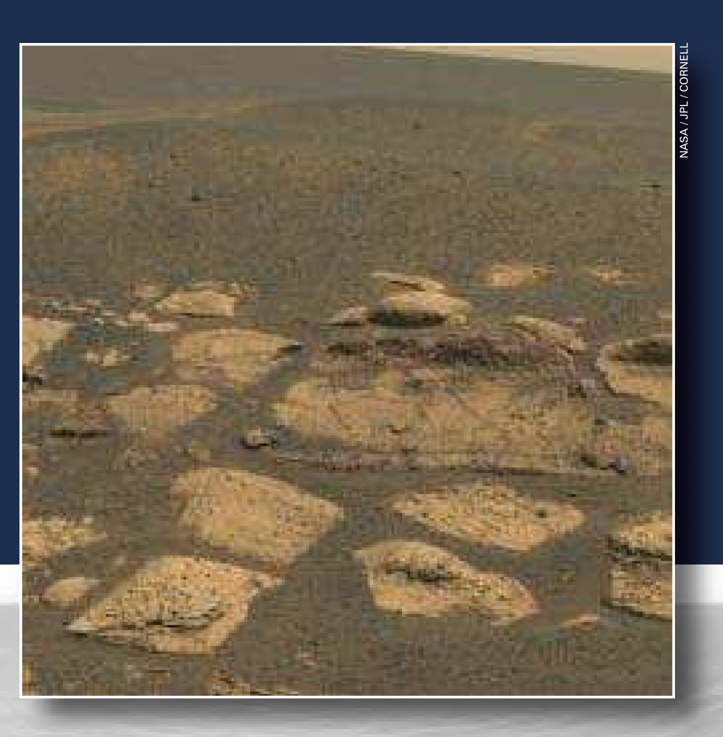
Diese Falschfarbenaufnahme zeigt feine Sedimentschichten im Gesteinsaufschluss, die infolge der Erosion deutlich hervortreten. Die bläulichen runden Körner haben sich vermutlich in den einst feuchten Sedimenten gebildet.



NASA / JPL / CORNELL



Am 17. Marstag – Sol 17 – spähte Opportunity über den Rand des Kraters Eagle. Das Bodenmaterial in Meridiani Planum hat die gleiche bräunlich graue Farbe wie dasjenige im Krater.



NASA / JPL / CORNELL

Die so genannten »chaotischen Terrains« am Ostrand des Canyons Valles Marineris entstanden, als riesige Wassermengen katastrophenartig in die nördlichen Tiefebenen des Mars abflossen. Der Krater im Hintergrund ist 7,6 Kilometer breit.

ESA / DLR / FU BERLIN (G. NEUKUM)

ESA / DLR / FU BERLIN (G. NEUKUM)

◀ Die Thaumasia-Region zählt zu den geologisch komplexesten Arealen der Marsoberfläche. Die Kruste des Planeten wurde hier offenbar gedehnt, sodass sie in einzelne Schollen zerbrach.

ESA / DLR / FU BERLIN (G. NEUKUM)

10 Kilometer

10 Kilometer

▲ Der Krater des Marsvulkans Hecates Tholus ist asymmetrisch und zeigt mehrere Einstürze durch Entleerung der darunter liegenden Magmakammer.

ESA / DLR / FU BERLIN (G. NEUKUM)

Wanderkarte für Marsbesucher

Mit einer hoch aufgelösten räumlichen Kartierung der gesamten Marsoberfläche in Farbe ermöglicht die Mars-Express-Kamera die exakte Untersuchung von geologischen Formationen auf dem Roten Planeten.

Das Ziel, das ein internationales Wissenschaftlerteam ins Auge fasste, klang äußerst ambitioniert: die gesamte Oberfläche des Mars kartieren, und zwar so genau wie auf einer Wanderkarte, dreidimensional und in Farbe. Zwar bietet das Klima des Roten Planeten wenig, was Abenteurer anlocken könnte: Sandstürme fegen mit hundert Kilometern pro Stunde über eine trockene Wüstenei, und nachts sinken die Temperaturen auf bis zu minus 140 Grad Celsius. Doch die Bilder, die eine Stereokamera an Bord von Mars Express seit Anfang Januar zur Erde sendet, zeigen eine wunderbare neue Welt: beispielsweise das »Valles Marineris«, einen Canyon von mystischer Schönheit (Bild S. 34 oben). Das Tal ist rund viertausend Kilometer lang und bis zu zehn Kilometer tief. Inzwischen können wir mit Gewissheit sagen, dass durch solche Schluchten einst viel Wasser geflossen ist – zumal am Südpol des Mars Wassereis (partiell mit Kohlendioxidschnee vermischt) nachgewiesen werden konnte.

Die Kamera, welche die Aufsehen erregenden Bilder liefert – die High Resolution Stereo Camera oder kurz HRSC – ist ein bislang einmaliges Experiment: Erstmals kann eine Planetenoberfläche systematisch räumlich und in Farbe hoch aufgelöst abgebildet werden. Die Ergebnisse tragen dazu bei, fundamentale Fragen zur geologischen und klimatischen Geschichte des Roten Planeten zu beantworten.

Die räumliche Auflösung der Stereobilder übertrifft bisherige topografische Daten der Marsoberfläche bei weitem. Selbst nur 10 bis 20 Meter große Details lassen sich erfassen. Mit dem Super Resolution Channel (SRC) – einem zusätzlichen, ultrahochauflösenden Teleobjektiv mit eigenem CCD-Sensor – lassen sich sogar zwei bis drei Meter große Objekte in die farbigen Stereobilddaten der HRSC einbetten. Damit können beispielsweise Felsbrocken in der Größe einer Garage oder feine Schichtungen in Sedimentgesteinen identifiziert werden.

Die 20 Kilogramm schwere HRSC verfügt über zwei Kameraköpfe: den hochauflösenden Stereokopf, der aus 9 CCD-Zeilensensoren besteht, die hinter einem Linsenobjektiv parallel angeordnet sind, sowie den SRC-Kopf, der aus einem Spiegelteleobjektiv und einem CCD-Flächensensor aufgebaut ist und praktisch als zehnter Kanal der eigentlichen HRSC auf der Digitalstrecke des Instruments betrieben wird.

Der hochauflösende Stereokopf funktioniert wie ein Scanner: Seine neun quer zur Flugrichtung angeordneten CCD-Zeilensensoren nehmen auf Grund der Vorwärtsbewegung der Mars-Express-Sonde in etwa den gleichen Bildstreifen auf der Marsoberfläche nacheinander Zeile für Zeile auf. Dabei bildet jeder Sensor dasselbe Objekt auf der Oberfläche unter einem unterschiedlichen Blickwinkel ab. Am Boden werden dann aus fünf dieser Bildstreifen 3-D-Bilder erzeugt. Die verbleibenden vier der neun Zeilensensoren sind mit speziellen Farbfiltern für die Aufnahme multispektraler Daten versehen.



DLR / FU BERLIN / ESA

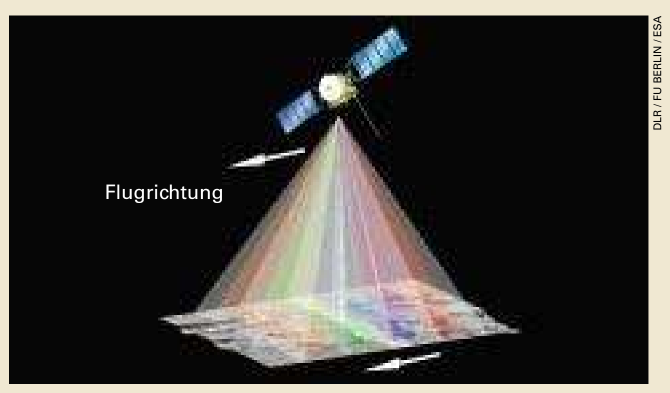
Die Linse der HRSC sitzt hinter der rechteckigen, schwarzen Blende, die verhindert, dass störendes seitliches Streulicht in die Kamera gelangt. Darunter befindet sich das hochauflösende Lupenteleskop SRC.

Auf ihrer elliptischen Umlaufbahn nähert sich Mars Express der Oberfläche des Roten Planeten bis auf 270 Kilometer. In dieser Höhe beträgt die Auflösung der HRSC elf Meter pro Bildpunkt. Ein aufgenommener Bildstreifen ist 57 Kilometer breit und – je nach Übertragungskapazität – zwischen 300 und mehreren tausend Kilometer lang. Aus dessen Mitte zoomt der SRC 2,5 Kilometer × 2,5 Kilometer große Ausschnitte heraus mit einer Auflösung von 2,5 Metern pro Pixel.

Die Planung der Aufnahmesequenzen obliegt einem Team am DLR-Institut für Planetenerkundung in Berlin-Adlershof und am Institut für Geologische Wissenschaften der FU Berlin. An der Auswertung der Daten sind 25 Institute aus zehn Ländern beteiligt.

Gerhard Neukum

Der Autor ist Professor für Planetologie am Institut für Geologische Wissenschaften der Freien Universität Berlin und Projektleiter der HRSC, deren Entwicklung er am DLR-Institut für Planetenerkundung in Berlin-Adlershof geleitet hat.



DLR / FU BERLIN / ESA

Die hochauflösende Stereokamera (HRSC) an Bord von Mars Express erzeugt neun linienförmige Bilder gleichzeitig. Jede der CCD-Zeilen besteht aus 5184 lichtempfindlichen Zellen. Vier CCD-Zeilen erfassen die Farben Rot, Grün, Blau und Nah-Infrarot, während die übrigen der Erstellung des dreidimensionalen Geländemodells dienen.

ESA / DLR / FU BERLIN (G. NEUKUM)

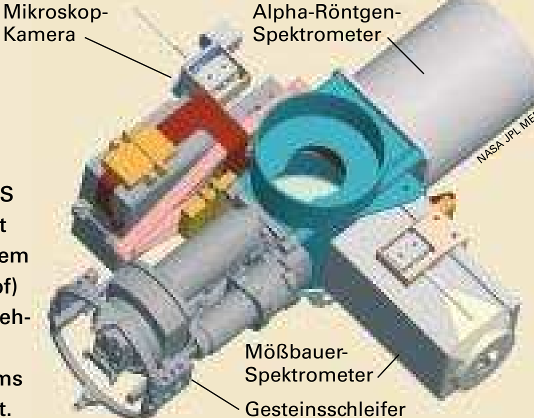
Das Alpha-Röntgen-Spektrometer APXS

Spürnase im Marssand

Mit Methoden der Röntgenanregung vermag das APXS sowohl leichte als auch schwere Elemente im Boden und im Gestein des Roten Planeten zu identifizieren.

Als erster der beiden Nasa-Marsrover landete Spirit am 4. Januar wohlbehalten im Krater Gusev. Bereits zwei Wochen später lieferte das an Bord befindliche Alpha-Röntgen-Spektrometer (Alpha Particle X-Ray Spectrometer, kurz APXS) erste Messergebnisse: In einem hoch aufgelösten Röntgenspektrum des Marsbodens zeichneten sich die charakteristischen Linien aller wesentlichen gesteinsbildenden Elemente ab: Natrium, Magnesium, Aluminium, Silizium, Kalium, Kalzium und Eisen. Ebenso waren die für den Marsboden typischen Linien von Schwefel und Chlor zu erkennen. Eine vorläufige Analyse dieser Befunde und auch derjenigen des Schwesterinstruments auf dem Rover Opportunity, der in der Ebene Meridiani Planum landete, bestätigte die Hypothese, die unsere Arbeitsgruppe am Mainzer Max-Planck-Institut für Chemie schon 1997 anhand der Daten der Mars-Pathfinder-Mission aufgestellt hatte: Der Staub auf dem Mars ist – zumindest im Äquatorialbereich des Planeten – global verteilt und relativ gut durchmischt.


MPI CHEMIE



Das APXS (links mit geöffnetem Messkopf) ist im Drehkopf des Roverarms integriert.

Wirklich aufregend waren dann die Befunde von Messungen an steinförmigen Gebilden an der Landestelle von Opportunity: Schwefel in auf dem Mars noch nie beobachteter Menge – nach dem Abbürsten der Staubschicht und dem Anbohren des Steins sogar noch mehr. Und sogar Brom! Die Frage, ob Wasser jemals in größerer Menge und für längere Zeit auf dem Mars vorhanden war, ist damit beantwortet: Ja, denn anders lassen sich die Befunde nicht erklären. Zusätzlich erhärtet wird diese Aussage durch Messungen mit dem Mößbauer-Spektrometer unserer Kollegen von der Universität Mainz, die eindeutig die Signaturen eines Eisenminerals namens Jarosit identifizierten, von dem man weiß, dass es nur durch Einwirken von Wasser entsteht.

Die Frage, ob sich auf dem Mars auch Leben entwickelt hat, ist damit allerdings noch nicht beantwortet: Die Anwesenheit von Wasser ist zwar notwendig, aber keineswegs hinreichend für die Entstehung von Leben.

Das Alpha-Röntgen-Spektrometer ist ein kleines Instrument, mit dem die chemische Zusammensetzung von Steinen und Staub auf dem Mars bestimmt werden kann, indem es einfach einige Zeit an die zu untersuchende Probe gehalten wird. Wegen dieser Eigenschaft erhielt sein Vorgänger während der Pathfinder-Mission den Spitznamen »Schnüffler«. Für Spirit und Opportunity haben wir unter Mitwirkung des Instituts für Anorganische und Analytische Chemie der Universität Mainz das APXS wesentlich verbessern können. Hier befindet sich nun der Messkopf zusammen mit zwei weiteren Instrumenten (dem Mößbauer-Spektrometer und einer Mikroskop-Kamera) sowie einem Werkzeug (dem Gesteinsschleifer RAT) auf einem Karussell am Ende eines beweglichen Roboterarms. Für eine Messung fährt der Rover an das gewählte Zielobjekt heran und positioniert mit Hilfe dieses Arms den Sensor an der gewünschten Stelle. Nach einer Messzeit von 10 Minuten bis zu mehreren Stunden (je länger, desto genauer) werden die Daten an den Roverrechner übergeben und von dort zur Erde gesandt.

Während der Messung wird die Probe mit Alphateilchen und Röntgenstrahlen aus einer radioaktiven Quelle beschossen und dadurch ihrerseits zum Aussenden von Röntgenstrahlung angeregt. Ein neuartiger Röntgendetektor mit besonders hoher Auflösung bei nur mäßiger Kühlung – übrigens von dem Münchner Technologieunternehmen Ketek in Zusammenarbeit mit dem Halbleiterlabor der Max-Planck-Gesellschaft entwickelt – registriert diese Strahlung. Aus dem sich ergebenden Spektrum lassen sich dann die Häufigkeiten der Elemente in der Probe berechnen.

Die verwendete radioaktive Quelle hat eine besondere Eigenschaft: Sie sendet sowohl Alphateilchen als auch Röntgenstrahlung aus. Dies ist insofern von Vorteil, als Alphateilchen besonders gut leichte Atome wie Natrium, Magnesium, Aluminium und Silizium anregen, während das Röntgenlicht bevorzugt schwerere Elemente wie Eisen, Nickel, Zink und Brom zum Strahlen bringt. Die Quelle wurde am Russischen Zentralinstitut für Atomreaktoren in Dimitrowgrad speziell für den Einsatz im APXS entwickelt und besteht aus dem Isotop 244 des Transurans Curium in der Form von Curiumsilizid. Das Ergebnis ist eine hohe Empfindlichkeit des Spektrometers für praktisch alle Elemente, die in Steinen und Böden mit nennenswerter Häufigkeit vorkommen, was bei reiner Röntgenanregung oder Anregung durch Elektronenstrahlen nicht der Fall wäre. Lediglich sehr leichte Elemente wie Wasserstoff, Kohlenstoff oder Sauerstoff werden vom Detektor nicht »gesehen«: Die Energie ihrer charakteristischen Röntgenstrahlung ist so gering, dass sie das Eintrittsfenster des Detektors nicht durchdringen kann.

Rudolf Rieder

Der Autor ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Kosmochemie des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz. Er leitete die Entwicklung und den Bau des Alpha-Röntgen-Spektrometers und ist Projektleiter des APXS-Experiments auf der Mars-Exploration-Rover-Mission der Nasa.

Fremde Geschlechtshormone im Uterus

In welchem Grade ein Säugetier männlich oder weiblich wird, hängt nicht nur von seiner eigenen Ausstattung ab. Schon vor der Geburt können vielerlei hormonartige Einflüsse von außen daran mitwirken.

Von John G. Vandenbergh

Aus einem Embryo mit zwei X-Chromosomen wird ein Mädchen, besitzt der Keim jedoch ein X- und ein Y-Chromosom, kommt ein Junge zur Welt! Diese simple Regel lernen wir in der Schule. An sich sind die Verhältnisse aber beim Menschen wie auch bei anderen Säugetieren viel komplizierter.

Zwar stellen die Geschlechtschromosomen in der Regel die Basis für die Geschlechtlichkeit dar. Doch wie diese Entwicklung letztlich verläuft, hängt noch von sehr vielem anderen ab. Sogar äußere Faktoren können sich auf die späteren körperlichen und Verhaltenseigenschaften auswirken. Auch bei der Ausbildung von Geschlechtseigenschaften greifen Gene und Umwelt eng ineinander.

Genau genommen gibt es keine klare Grenze zwischen weiblich und männlich. Vielmehr scheinen bei den meisten Merkmalen Zwischenformen fast jeden Grades möglich. Besonders frühe Einflüsse im Uterus bestimmen teilweise lebenslang, ob das Individuum später typisch männlich – beziehungsweise weiblich – aussehen und sich verhalten wird oder nicht. Genauer haben meine Mitarbeiter und ich solche Zusammenhänge an Nagetieren erforscht, die im Uterus hormonellen Faktoren aus der Umgebung ausgesetzt waren. Der Befund, dass ein Fetus durch fremde Sexualhormone nachhaltig in seiner Geschlechtsentwicklung manipuliert werden kann, lehnt sich unmittelbar an die neueren Erkenntnisse über Gefahren durch Umweltschadstoffe mit hormonähnlichen – oder auch Hormone störenden – Wirkungen an.

Wer schon einmal einen jungen Hund aufgezogen hat, weiß, wie stark die Fortpflanzungsreife – also die Aktivität der Keimdrüsen – dessen Verhalten verändert. Plötzlich verliert das Tier die Lust, Schuhe zu zerfetzen, und gewinnt besonderes Interesse am anderen Geschlecht. In der Pubertät schießen die Sexualhormone über. Das geschieht bei beiden Geschlechtern: Die Hoden schütten hauptsächlich Testosteron aus, die Eierstöcke Östrogen und Progesteron. Diese Hormone verändern nicht nur das Verhalten, sondern auch physiologische Vorgänge und den Körperbau.

Im weiblichen Geschlecht ist dies der erste Hormonschub der Keimdrüsen, im männlichen bereits der zweite. Schon beim Fetus bilden die Hoden vorübergehend größere Mengen von Testosteron. Bei Labormäusen beispielsweise setzt diese Phase in der Mitte der Trächtigkeit ein und flaut vier bis fünf Tage nach der Geburt ab. Beim Menschen, der weiter entwickelt zur Welt kommt, liegt sie entsprechend früher. Unterbindet man bei den Nagern die Produktion oder Wirkung dieser Hormone, entwickelt sich das genetisch männliche Tier zu einem Weibchen. Es bildet Eierstöcke aus und benimmt sich später dazu passend.

»Männliche« Rattenweibchen

Aber auch bei genetischen Weibchen beeinflusst ein Kontakt mit Testosteron im Uterus, je nach dessen Menge, den Grad der Geschlechtsausprägung. Das entdeckten Biologen in den frühen 1970er Jahren an Ratten. Bei frisch geborenen Nagetieren lässt sich das Geschlecht recht einfach am Abstand der Genitalien

Mäusefeten liegen aufgereiht in den Hörnern der Gebärmutter. Weibliche Feten, die zwischen zwei männlichen liegen, nehmen Testosteron auf und entwickeln sich etwas mehr in männliche Richtung.

SASAKI / PHOTO RESEARCHERS INC.

zum After bestimmen: Die Distanz ist bei den männlichen Jungtieren stets etwas größer (siehe Bild auf S. 41 oben). Linda Coniglio, damals Doktorandin bei Lynwood Clemens an der Michigan State University in East Lansing, beobachtete, dass dieser Anogenitalabstand bei manchen weiblichen Jungtieren weiter ist als bei anderen, wenn auch nie so groß wie bei männlichen.

Nachforschungen ergaben schließlich, dass die Lage der Rattenfeten im Uterus darauf Einfluss hat. Als die Forscher per Kaiserschnitt ermittelten, neben welchen Geschwistern die weiblichen Tiere herangewachsen waren, ergab sich ein deutliches Muster: Der Anogenitalabstand war größer, wenn die Weibchen nahen Kontakt zu männlichen Feten gehabt hatten. Waren es mehrere gewesen, zeigte sich der Effekt umso deutlicher. Testosteron ist ein Steroidhormon, das Zellmembranen leicht passiert. Offensichtlich nehmen die weiblichen Feten das Hormon auf, wenn sich neben ihnen Männchen befinden.

Das gleiche Phänomen tritt auch bei anderen Nagern auf, zum Beispiel bei Haus- und bei Rennmäusen. Frederick vom Saal von der Universität von Missouri in Columbia und seine Mitarbeiter untersuchten es genauer an Labormäusen. Wegen ihrer oft großen Würfe eignen sie sich für solche Studien besonders gut. Die Feten liegen in den beiden Uterushörnern aufgereiht hintereinander. Man kann also recht einfach erfassen, ob ein junges Weibchen zwischen zwei Männchen heranwuchs oder ob es nur einen männlichen Nachbarn hatte oder gar keinen. Dieser Befund lässt sich dann mit dem Anogenitalabstand abgleichen. Auf die Männchen, zumindest bei der Labormaus, scheint es umgekehrt keinen so deutlichen Effekt zu haben, wenn sie in der Gebärmutter neben Weibchen liegen.

Den Arbeiten der Gruppe um vom Saal ist zu verdanken, dass normalerweise kein Kaiserschnitt mehr notwendig ist, um bei Mäusen und anderen Nagern das Ausmaß der pränatalen Testosteronexposition eines weiblichen Jungtiers recht zuverlässig zu bestimmen. Es genügt, den Abstand zwischen After und Genitale zu messen und mit dem Kör- ▷

IN KÜRZE

▶ Aus Tierstudien ist schon länger bekannt, dass auf den Fetus bereits vor der Geburt **Geschlechtshormone von Wurfgeschwistern** oder etwa bei Stress mehr männliche Hormone der Mutter einwirken. Solche Hormone können beeinflussen, in welchem Grad sich männliche oder weibliche Merkmale ausbilden. Sie verschieben nicht nur anatomische und physiologische Eigenschaften, sondern auch die weitere Entwicklung und das spätere Verhalten.

▶ Sorgen bereitet Epidemiologen neuerdings, dass viele **Stoffe aus der Umwelt** bei Tier und Mensch ähnliche Effekte zu haben scheinen. Ein Großteil dieser so genannten ***endocrine disruptors*** wird künstlich produziert. Manche davon agieren im Organismus selbst wie Geschlechtshormone, andere stören deren Funktion.

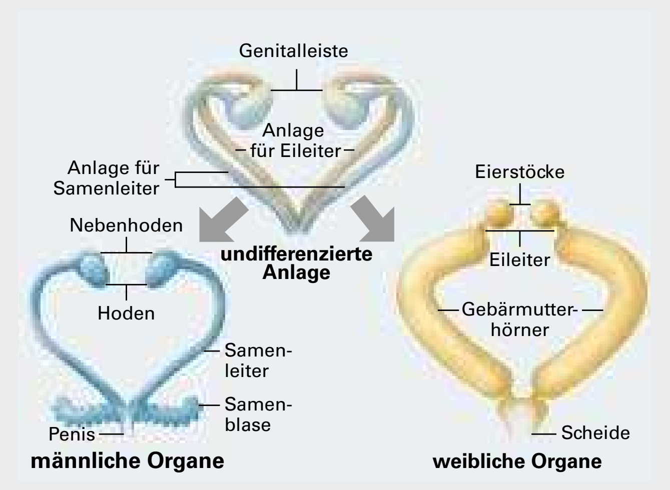
Sexualhormone in der frühen Geschlechtsausprägung

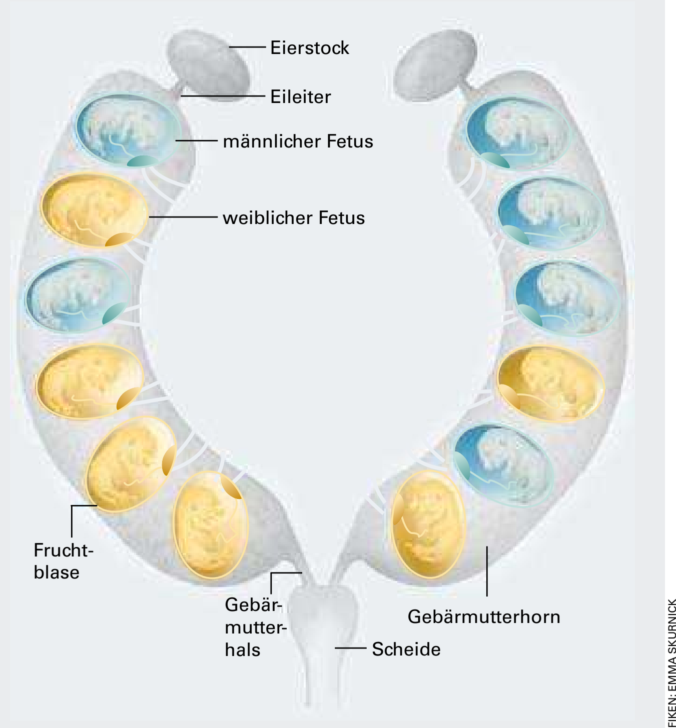
Studien an Nagetieren

Die inneren Geschlechtsorgane einer Maus entwickeln sich etwa ab dem zehnten oder elften Tag nach der Befruchtung (linkes Bild). Zunächst erscheinen die Anlagen für beide Geschlechter. Um den zwölften Tag entstehen bei den Männchen Hoden. Sie produzieren männliches Hormon. Dadurch bilden sich die Anlagen für Eileiter zurück, und Samenleiter und Samenblasen differenzieren sich aus. Eierstöcke entstehen etwas später als Hoden. Wenn das männliche Hormon fehlt, bilden sich Eileiter und Uterus aus.

Bei Kleinsäugern mit großen Würfen bestimmt die Position im Uterus, wie viel Testosteron die einzelnen weiblichen Feten ausgesetzt sind (rechtes Bild). Liegt ein Weibchen zwischen zwei Brüdern, entwickelt es sich etwas männlicher – ein Effekt mit lebenslangen Folgen für Physiologie und Verhalten.

In der Embryonalentwicklung entstehen zunächst undifferenzierte Anlagen sowohl für die männlichen wie die weiblichen inneren Geschlechtsorgane. Normalerweise werden die Genitalleisten genetisch männlicher Tiere zu Hoden, die genetisch weiblicher zu Eierstöcken. Hodenhormone veranlassen die weitere Entwicklung der männlichen Organe. Wenn sie fehlen, formen sich die weiblichen Strukturen aus.





GRAFIKEN: EMMA SKURNICK

pergewicht zu verrechnen, um den Grad der vorgeburtlichen »Maskulinisierung« zu kennen.

Bald suchten Forscher bei den betreffenden Nagerweibchen nach weiteren Anzeichen einer leichten Vermännlichung. So wiesen Kenneth Faber und Claude Hughes von der Duke University in Durham (North Carolina) in den frühen 1990er Jahren nach, dass bei diesen Rattenweibchen Gehirngebiete im Hypothalamus etwas größer ausgebildet sind als bei anderen Weibchen. Diese Regionen sehen bei männlichen Ratten stets prägnanter aus als bei weiblichen. Sie sind offensichtlich für das Paarungsverhalten bedeutsam.

Bei Nagern zeigten sich auch je nach Uterusposition Unterschiede in den eigenen Hormonwerten im späteren Leben. Lag ein Weibchen zwischen zwei männlichen Feten, weist es im Erwachsenenalter etwas höhere Testosteronwerte auf als weibliche Tiere mit nur weiblichen Geschwistern neben sich. Generell sind Männchen für Testosteron empfänglicher als Weibchen: Ihre Zellen und Gehirnzentren sprechen auf das Hormon stärker an. Das gilt – in geringerem Maße – ebenfalls für Weibchen, die männliche Gebärmuttergeschwister neben sich hatten. Wegen des frühen Hormoneinflusses lassen sich ihr Verhalten und einige physiologische Abläufe im Erwachsenenalter deutlicher als bei anderen Weibchen durch künstliche Testosterongaben beeinflussen.

Sogar die Geschlechtsreife, die bei männlichen Säugern allgemein später beginnt als bei weiblichen, setzt bei diesen Weibchen etwas verzögert ein. Zudem verlaufen die Zyklen der Eireifung etwas unregelmäßiger. Trotz alldem sind diese Tiere aber eindeutig Weibchen mit funktionsfähigen Geschlechtsorganen. Sie lassen sich begatten und werden trächtig, und die Würfe enthalten die normale Jungenzahl.

Allerdings begatten Mäusemännchen, wenn sie die Auswahl haben, die maskulineren Weibchen weniger gern. Sie kommen bei ihnen nicht ganz so gut zum Zuge, weil diese leicht vermännlichten Weibchen dabei eine etwas ungeschickte Haltung einnehmen. Insgesamt geben sich solche Weibchen öfter aggressiv und sind überdies neugieriger als weniger maskuline Tiere. Man kann auch beobachten, dass sie Geschlechtsgenossinnen mehr besteigen als jene das tun.

Populationsbiologen fragen sich, ob solche Geschlechtsvarianten auch bei Wildmäusen und anderen Wildnagern eine Bedeutung haben. Unter natürlichen Verhältnissen sollte stets ein Teil der Weibchen im Uterus Testosteron

von männlichen Feten ausgesetzt gewesen sein. Die daraus resultierenden physiologischen und Verhaltensunterschiede könnten sich zum Beispiel in natürlichen Populationen auf die Fortpflanzungschancen auswirken.

Um das zu prüfen, haben mein damaliger Mitarbeiter William Zielinski, vom Saal und ich in einer mittlerweile klassischen Studie je vierzig männliche und weibliche Hausmäuse auf einer Grünfläche ausgesetzt, die mitten in einem großen Autobahnkreuz lag. Sie maß etwa ein Hektar und bildete quasi ein natürliches Gehege, denn sie war rings von mehrspurigen Straßen umschlossen. Die bisherigen Bewohner hatten wir zuvor eingefangen und woanders freigelassen. Die gewählte Populationsdichte – achtzig erwachsene Mäuse auf einem Hektar – bedeutete leicht gedrängte Verhältnisse. Sie lag im oberen Bereich der Dichte, die auch sonst auf solchen Verkehrsinseln auftritt.

Fallenstellen an der Autobahn

Alle Versuchstiere hatten wir per Kaiserschnitt zur Welt geholt. Wir verwendeten nur Männchen, die neben einem Weibchen und vielleicht einem Männchen herangewachsen waren. Von den Weibchen hatte die Hälfte gar kein männliches Uterusgeschwister gehabt, die andere Hälfte zwei. Alle Mäuse waren individuell markiert. Auf der Autobahninsel hatten wir Fallen gleichmäßig verteilt, die wir jeden Abend öffneten und mit Leckerbissen bestückten.

In der Frühe ließen wir alle gefangenen Mäuse wieder frei. Dabei kontrollierten wir, wer in welche Falle gegangen war. Da wir viele Tiere öfter erwischten, konnten wir individuelle Streifgebiete ermitteln. Wir erfassten auch den Gesundheitszustand jeder Maus und von den Weibchen, ob sie gerade trächtig waren oder Junge säugten. Diesen Versuch führten wir einmal im Herbst und einmal im Frühjahr durch.

Im Großen und Ganzen entsprachen die Ergebnisse unserer Erwartung. Die Streifgebiete von Weibchen mit zwei männlichen Uterusgeschwistern waren um 40 Prozent größer. Im Frühjahr nutzten sie genauso viel Fläche wie in dieser Jahreszeit die Männchen. Das verhalf ihnen allerdings nicht, wie wir postuliert hatten, zu mehr Jungtieren. Eher waren die anderen Weibchen hierin insgesamt etwas erfolgreicher. Vorstellbar wäre, dass aggressivere Weibchen sich in unbekanntem Gelände oder unter sehr kargen Verhältnissen besser durchsetzen, andere Weibchen dagegen bei reichem Nahrungsangebot, also unter relativ günstigen Lebensbedingungen. Unsere Vermutung, die leicht maskulinisierten Weibchen würden bei relativ großer Populationsdichte besser überleben können, fanden wir ebenfalls nicht bestätigt.

Forscher wissen heute, dass weibliche Embryonen kleiner Säugetiere nicht nur wegen männlicher Uterusgeschwister maskuliner werden. Auch die Mutter selbst produziert manchmal mehr Testosteron, zum Beispiel bei hoher Populationsdichte oder wenn sie aus anderen Gründen unter Stress steht. Dann sind sämtliche Weibchen im Wurf ähnlich vermännlicht wie sonst Weibchen mit zwei männlichen Uterusgeschwistern. Es könnte sich dabei um einen natürlichen Mechanismus handeln, der ermöglicht, dass diese Tiere bei Übervölkerung leichter abwandern.

Erstaunlicherweise verschiebt sich in den Würfen maskulinisierter Weibchen auch das Geschlechterverhältnis. Sie gebären fast 60 Prozent Männchen. Umgekehrt bringen Weibchen, die neben sich nur weibliche Uterusgeschwister hatten, zu fast 60 Prozent Weibchen zur Welt. Wie es dazu kommt, kann die Wissenschaft bisher nicht erklären. Es könnte aber sein, dass solche Effekte bei den extremen Populationsschwankungen mitwirken, wie sie zum Beispiel für Lemminge bekannt sind (siehe Kasten S. 43).

Typischerweise spielen junge Rattenmännchen lebhafter und ruppiger als Weibchen. Waren sie als Fetus dem Pilzmittel Vinclozolin ausgesetzt, nimmt der Unterschied ab.

OKAPIA



JOHN G. VANDENBERGH

Bei neugeborenen Mäusen ist der Abstand zwischen After und Genitalöffnung bei den Männchen (links im Foto) größer als bei den Weibchen (rechts im Foto). Unter Testosteroneinfluss im Uterus erscheint die Distanz bei den Weibchen aber etwas weiter als bei weiblichen Wurfgeschwistern, die der Hormonwirkung nicht ausgesetzt waren.

Dass ähnliche Hormoneinwirkungen im Uterus auch bei größeren Säugetieren auftreten können, lassen etwa Beobachtungen an Schafen annehmen. Beim Menschen erwies eine britische Studie an Zwillingspaaren, dass Mädchen mit einem Zwillingsbruder unternehmungslustiger und waghalsiger sind als der Durchschnitt. Inwieweit das auf das Zusammensein mit einem männlichen Spielgefährten zurückgeht, ist allerdings nicht geklärt. Für einen starken vorgeburtlichen Hormoneffekt sprechen wiederum einige anatomische Merkmale an Gebiss und Ohren dieser Mädchen.

Nachgewiesen sind zumindest Testosteroneinflüsse auf das ungeborene Kind, wenn die Mutter Stress erlebt. Gleiches gilt für Mangelernährung. Offenbar sind Menschen, denen dergleichen im Mutterleib widerfuhr, später für viele der kreislauf- und stoffwechselbedingten Zivilisationskrankheiten besonders anfällig. ▷

Ein drastisches Beispiel für die lebenslangen Folgen eines frühen Testosteroneinflusses liefert eine Langzeitstudie der amerikanischen Psychologin Sheri Berenbaum von der Pennsylvania State University in University Park zum so genannten adrenogenitalen Syndrom. Bei dieser Erkrankung hat ein angeborener Enzymdefekt zur Folge, dass sich die Nebennieren ungewöhnlich vergrößern. Im Normalfall produzieren sie in beiden Geschlechtern geringe Mengen von Testosteron. Nun aber überschütten sie den Körper damit, auch schon vor der Geburt.

Erfolgen keine Gegenmaßnahmen, leiden die Betroffenen lebenslang an den Auswirkungen viel zu hoher Testosteronspiegel. Bei den Mädchen ist das Verhalten in jeder Hinsicht jungenhaft. Das ändert sich nicht, nachdem die männlichen Hormone wegen einer Behandlung nicht mehr wirken können. Sheri Berenbaum wies nach, dass diese Festlegung tatsächlich schon beim Fetus erfolgte und nicht erst auf Hormone zurückgeht, die später auftraten.

Hormonelle Störkomponenten aus der Umwelt

Dass gezielt verabreichte Medikamente mit Hormoneigenschaften das ungeborene Kind beeinträchtigen können, verwundert beim heutigen Kenntnisstand nicht mehr. In den 1950er und 1960er Jahren erhielten Schwangere bei drohender Fehlgeburt das künstliche Östrogen Diethylstilbestrol. Häufig traten danach Fehlbildungen der Geschlechtsorgane auf. Die Töchter litten öfter als normal an einem seltenen Scheidenkrebs.

Doch auch die Umgebung der Mutter liefert eine Vielzahl von Substanzen, die entweder Hormoneigenschaften haben oder mit körpereigenen Hormonen oder deren Rezeptoren wechselwirken. Schwangere sind ihnen fortwährend ausgesetzt. Wissenschaftler bezeichnen diese Stoffe in ihrer Gesamtheit mit dem englischen Ausdruck »endocrine disruptors«, was man mit »hormonelle Störenfriede« übersetzen könnte. Manche Ökologen und Epidemiologen sprechen auch von Umwelt- oder Exohormonen.

Nicht alle, aber doch sehr viele dieser Verbindungen sind Menschenwerk, und viele davon sind neueren Ursprungs. Der Verdacht, dass solche Stoffe ungeborenes Leben beeinträchtigen können, trat erstmals in den 1950er und 1960er Jahren auf. Wie sich zeigte, reichert sich das unter anderem für die Malariabekämpfung segensreiche Insektizid DDT in den Nahrungsketten an und schädigt dann deren Endglieder, also zum Beispiel Vögel oder den Menschen. DDT ist fettlöslich und wird im Fettgewebe gespeichert. Von dort geht es in die Muttermilch über. Ornithologen beobachteten damals, dass insbesondere Raubvögel Eier mit viel zu dünnen Schalen legten, und dass die Vogeljungen auch unabhängig von der Qualität der Eischale Entwicklungsdefekte aufwiesen.

In Deutschland ist DDT seit über dreißig Jahren verboten. Doch in letzter Zeit vermuten Wissenschaftler zunehmend Hormoneffekte etlicher anderer in der Umwelt vorhandener Fremdstoffe bei Mensch und Tier, die ebenfalls Besorgnis erregen. Oft sehen diese Verbindungen in ihrer chemischen Struktur gar nicht wie Hormone aus. Sie sind in vielen Kunststoffen, in Industriechemikalien oder auch in Pestiziden enthalten. In der Natur scheinen diese Substanzen ungewöhnliche Phänomene zu verursachen, die seit einigen Jahren auftreten. So berichten Forscher von auffälligen Fortpflanzungseinbußen bis hin zu Geschlechtsveränderungen bei ganz verschiedenen Tieren, von Schnecken über Alligatoren bis zu Säugern – der Mensch nicht ausgenommen.

Mediziner haben solche Stoffe im Verdacht, für die beobachteten steigenden Raten von Brust- und Hodenkrebs beim Menschen mitverantwortlich zu sein. Auch die stark zurückgegangene Spermienzahl im Ejakulat könnte damit zusammenhängen sowie die immer frühere Pubertät bei Mädchen. Tatsächlich wechselwirken viele dieser künstlichen Verbindungen mit der Produktion von körpereigenem Östrogen oder mit der Ansprechbarkeit der Körperzellen auf Östrogen. Außerdem bilden auch manche Pflanzen natürlicherweise hormonähnliche Wirkstoffe, darunter die so genannten Phytoöstrogene. In unserer Umwelt kommen noch die hormonellen Verhütungsmittel hinzu, die in großen Mengen in die Gewässer gelangen. Auf Funktion oder Bildung männlicher Hormone hat nach bisherigem Wissen nur ein kleiner Anteil der bisher bekannten dieser Stoffe Einfluss.

Die Grünfläche eines Autobahnkreuzes diente als Versuchsgelände, um das Freilandverhalten von Mäuseweibchen zu erproben. Wer von ihnen vor der Geburt viel Testosteron ausgesetzt gewesen war, nutzte durchschnittlich eine größere Fläche – eher ähnlich den Streifgebieten von Männchen.

Solche Zusammenhänge zu beweisen, ist allerdings nicht einfach. Gemeinsam mit vom Saal haben wir bei Mäusefeten die potenzielle Wirkung einer verdächtigten Substanz – Bisphenol A – auf die Geschlechtsausbildung näher untersucht. Bisphenol A ist als Weichmacher in vielen Kunststoffen enthalten, auch in der Innenauskleidung von Konservendosen, in Kunstharzen für Zahnprothesen und in Babyfläschchen aus Plastik. Von dort geht es in die Nahrung, in den Körper und in die Umwelt über.

Unter anderem wirkt die Verbindung östrogenähnlich. Bei Männchen kann sie in höherer Konzentration die Fruchtbarkeit stören und auch eine Verweiblichung herbeiführen. Wir stellten fest, dass weibliche Jungtiere, deren Mutter Bisphenol A in der Schwangerschaft gefressen hatte, nach der Geburt schneller wuchsen und früher geschlechtsreif wurden – und zwar abhängig von der Lage im Uterus, die wir durch Kaiserschnitt ermittelt hatten: Der Effekt zeigte sich am stärksten bei Weibchen ohne männliche Uterusgeschwister neben sich und nur schwach, wenn beidseits ein männlicher Fetus gelegen hatte. Die »weiblichsten« Weibchen reagierten also besonders empfindlich.

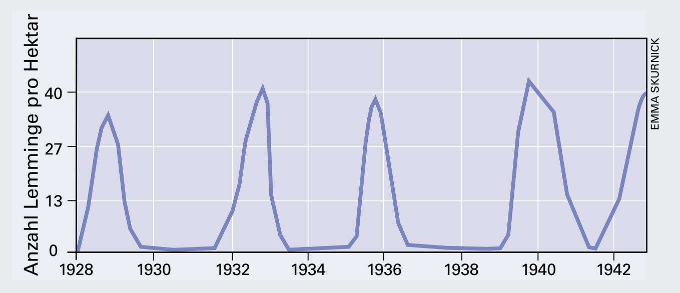
Wenn Umwelthormone oder Hormonstörsubstanzen die körperliche Geschlechtsentwicklung beeinflussen können, sollten sie sich auch auf das geschlechtsspezifische Verhalten auswirken, zum Beispiel auf Art und Ausmaß des Spiels, was bei männlichen und weiblichen jungen Säugetieren verschieden ist. Vor der Geschlechtsreife gehört Spielen

Der Zyklus der Lemminge

Ursachen für natürliche Populationsschwankungen

Lemminge und andere Wühlmäuse sind für ihre extremen Bestandsdichteschwankungen bekannt. Möglicherweise wirken dabei physiologische und Verhaltensunterschiede der Tiere mit, die auf vorgeburtliche Hormoneinflüsse zurückgehen. In stressarmen Zeiten, wenn den Tieren viel Platz zur Verfügung steht, würden im Verhältnis mehr weibliche Junge geboren. Unter gedrängten Verhältnissen kämen zum einen mehr Männchen zur Welt, zum anderen auch mehr relativ maskuline Weibchen – die ihrerseits verhältnismäßig mehr männliche Junge produzieren. So könnte die Population in ruhigen Phasen rasch anwachsen und würde, wenn das Gedränge überhand nimmt, schnell wieder schrumpfen.

OKAPIA



Diese typischen Zyklen einer Lemmingpopulation zeichnete der amerikanische Ökologe Viktor E. Shelford (1877–1968) in der kanadischen Provinz Manitoba auf. Die Populationen der kleinen Nager scheinen alle paar Jahre zu explodieren und dann plötzlich wieder zusammenzubrechen.

zu den wenigen Verhaltensweisen, in denen sich beide unterscheiden. Die jungen Männchen spielen insgesamt ruppiger, heftiger und auch mehr. Sie tollen oft herum und balgen sich gern. Offensichtlich geht dies auf den Testosteronstoß zurück, den sie vor der und um die Geburt produzieren. Unterbindet man beim Fetus das männliche Hormon durch ein Gegenmittel, spielen etwa junge Rattenmännchen wie Weibchen. Umgekehrt spielen weibliche Jungtiere auf mehr männliche Weise, wenn sie als Fetus einem Schub Testosteron ausgesetzt waren.

Verhaltenseffekt eines Spritzmittels

Zu den künstlichen Umweltchemikalien mit Hormonstörwirkung gehört das Pilzgift Vinclozolin. Es wurde seit Mitte der 1970er Jahre unter anderem im Obstanbau gegen Schimmelbildung verwendet, ist in Deutschland seit 1998 aber nicht mehr zugelassen. Es blockiert die Rezeptoren für Testosteron, unterbindet also dessen Hormoneffekt.

Den Einfluss dieses Stoffs auf das Spiel von jungen Ratten untersuchte kürzlich mein Mitarbeiter Andrew Hotchkiss zusammen mit Wissenschaftlern an der US-Umweltschutzbehörde. Tatsächlich bewirkte Vinclozolin, wenn man es Muttertieren in der Schwangerschaft spritzte, dass die jungen Männchen wie Weibchen spielten. Normalerweise begrüßen sich junge Männchen, die einige Stunden voneinander getrennt wurden, intensiv und balgen heftig miteinander. Jetzt hielten sie sich viel mehr zurück.

Erschreckend ist, wie viele hormonwirksame Substanzen es noch geben könnte, die als solche bisher unerkannt sind. Im Jahr 1998 listete die amerikanische Umweltschutzbehörde 87 000 Verbindungen auf, die untersucht werden müssten. An der chemischen Struktur allein lässt sich ihre Wirkung oft schwer erkennen. Am besten wäre das Potential in Tests wie den hier beschriebenen Verfahren an Labortieren festzustellen. Doch solche Untersuchungen sind kosten- und zeitaufwändig.

Selbst bei Substanzen mit erwiesener Störwirkung sind genauere Analysen schwierig. Das betrifft die vorhandene Konzentration in der Umwelt wie auch die Dosis, die bei Mensch und Tier Effekte hervorbringen würde. Oft empfiehlt es sich, mittlere Mengen zu testen. Allerdings können den Wissenschaftlern dann Wirkungen bei hoher oder niedriger Dosierung entgehen. Vertrackterweise schädigen mitunter winzigste Mengen stärker als etwas höhere. Es kommt auch vor, dass eine niedrige und eine hohe Dosis gegensätzliche Wirkungen zeitigen.

Die Tragweite – und in mancher Hinsicht vielleicht auch die natürliche Funktion – der hier berichteten Zusammenhänge muss die Forschung noch herausarbeiten. Sicher können wir sagen: Umwelteinflüsse vor der Geburt bestimmen die Geschlechtsentwicklung und die spätere Ausprägung der Geschlechtlichkeit oft mit. Wie in vielen anderen Bereichen auch verzahnt sich dabei die genetische Mitgift eng mit Faktoren von außen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



John G. Vandenbergh ist Professor emeritus für Zoologie an der North Carolina State University in Raleigh.

Effects of endocrine disruptors on behaviour and reproduction. Von Paola Palanza und Frederick S. vom Saal in: Behavioural Ecotoxicology, Hrsg. von Giacomo Dell'Omo. Wiley, 2002

Intrauterine position effects. Von B. C. Ryan und J. G. Vandenbergh in: Neuroscience and Biobehavioral Reviews, Bd. 26, S. 665, 2002

Endocrine disruptors. Von Manfred Metzler, Springer, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

DIAMANTEN

Funkelnde Täuschung

Synthetische Edelsteine gelingen in immer höherer Qualität

Das Feuer geschliffener Diamanten weckt Bewunderung und Begehrlichkeit, ihre sprichwörtliche Härte hat den Edelsteinen viele industrielle Anwendungen erschlossen. Während die Schmuckbranche natürlich gewachsenen Steinen den Vorzug gibt, begnügt sich die Industrie großteils mit künstlichen. Doch dank immer genauerer Kontrolle der Synthese verwischen die Unterschiede.

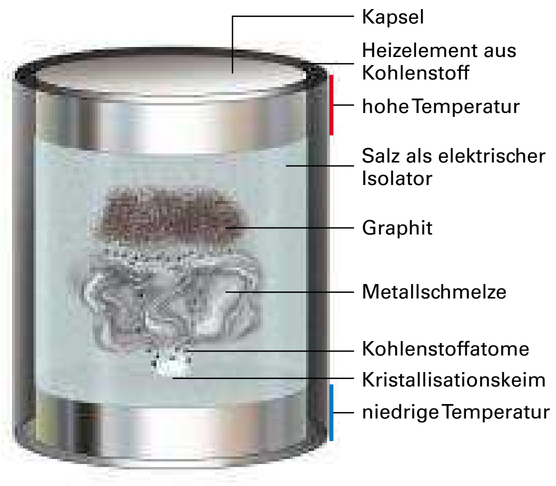
Natürliche Diamanten [von griechisch *adamas* = unbezwingbar] entstanden in mehr als 80 Kilometer Tiefe bei Drücken über 40 000 bar und Temperaturen von 900 bis 1300 Grad Celsius. Von dort gelangten sie entlang sehr tief reichender Vulkanschlote an die Erdoberfläche. Solche »Pipes« gibt es insbesondere in Sibirien und Südafrika. Dort wird ein Karat – also 0,2 Gramm Diamant – aus zwei Tonnen Muttergestein gewonnen. Zum Vergleich: Weltweit liegt der mittlere Ertrag bei einem Karat pro 25 Tonnen.

Seit 1955 werden die Bedingungen des Erdmantels in entsprechenden Anlagen simuliert, um künstliche Diamanten zu züchten. Quelle des Kohlenstoffs ist Graphit, der aus einer Metallschmelze auf einem winzigen Diamanten als Keim aufwächst. Industriediamanten dürfen mehrere hundert Mikrometer pro Stunde wachsen. Soll das Resultat aber zu Schmuck verarbeitet werden, sind nur wenige Mikrometer pro Stunde erlaubt (diese Angaben sind Näherungswerte, denn mit zunehmender Oberfläche steigt die Wachstumsrate). So entsteht in etwa zwanzig Stunden ein Karat Rohdiamant, der dann geschnitten und geschliffen wird. Das langsame und kontrollierte Aufwachsen hat seinen Grund: Es erschwert die Bildung von Fehlstellen im Kristallgitter. Nur dort könnten sich nämlich Metallatome aus der Schmelze einbauen, die größer sind als Kohlenstoff. Diese Verunreinigung war früher ein gängiges Kriterium zur Unterscheidung der künstlichen Steine von ihren Vorbildern.

Diamanten werden in vier verschiedene Klassen eingeteilt, dabei ist das Vorkommen von Stickstoff ein wichtiges Merkmal. Natürliche Steine gehören zu 98 Prozent zum Typ Ia und enthalten Ansammlungen (Cluster) von Stickstoffatomen, während bei den meisten synthetischen dieses Element atomar im Gitter eingebaut ist; diese Kristalle gehören zum Typ Ib (zu dem etwa 1,8 Prozent der »echten« Steine zählen). Das Adamas Gemological Laboratory in Brookline (US-Bundesstaat Massachusetts) nutzt diesen Unterschied bei der Edelsteinprüfung, denn Stickstoff-Cluster absorbieren Wellenlängen zwischen 430 und 480 Nanometer aus weißem Licht. Ein anderes Merkmal natürlicher Diamanten: Auf Grund ihrer Entstehung enthalten sie bis zu 50 verschiedene Fremdelemente.

Bis vor wenigen Jahren hätte sich der Aufwand für die Synthese von Schmucksteinen kaum gelohnt, denn nur wenige Prozent der Produkte waren für diesen edlen Zweck zu gebrauchen; heute sind es dank der genauen Prozesskontrolle bis zu 98 Prozent. Das amerikanische Start-up-Unternehmen Gemesis bringt farbige Steine auf den Markt, die bei gleicher Qualität sehr viel preisgünstiger sind als natürliche, zum Beispiel bei der Farbe Gelb bis zu einem Fünftel. Aber auch dann kosten solche Preziosen immer noch einige Tausend Euro – im Supermarkt werden Qualitätssteine so schnell nicht auftauchen. ◁

Der Artikel basiert auf »Carbon Copy« von **Mark Fischetti**, Scientific American. Die Redaktion dankt der Firma Gemsmart für Fachinformationen.



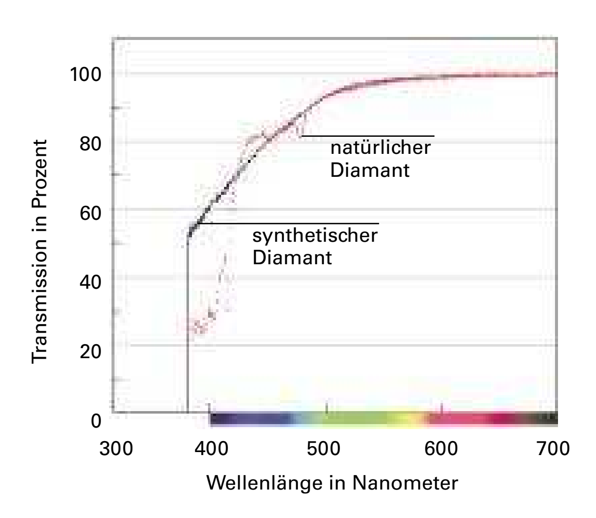
etwa 1,25 Zentimeter

▲ **Graphit löst sich in einer heißen Schmelze aus Eisen und Nickel und fällt dann Atom für Atom auf dem kühleren Keim aus, vergleichbar Wasserdampf, der sich morgens auf kühlen Flächen als Tau niederschlägt. Als Keim dient ein natürliches oder synthetisches Diamantbruchstück.**

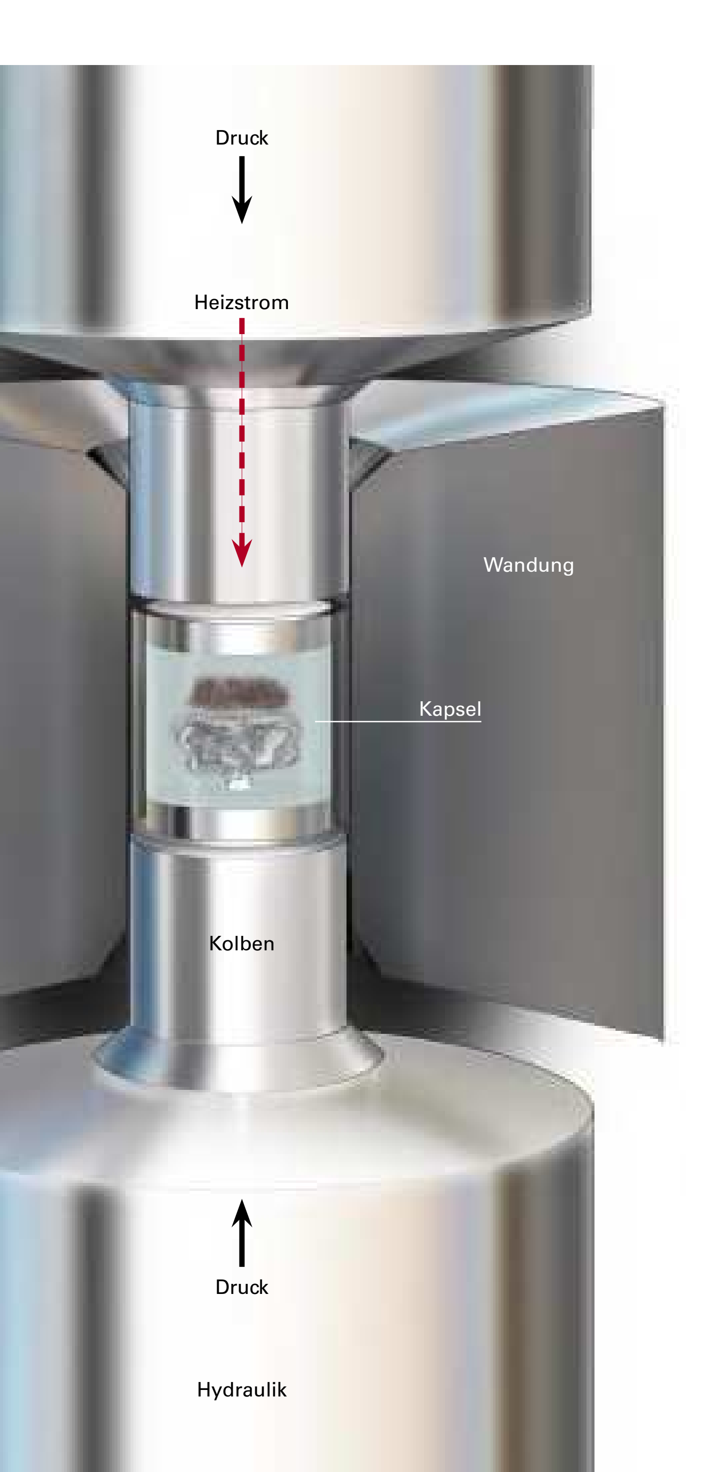
▶ **Die hydraulischen Kolben einer Diamantpresse üben auf eine Kapsel mit allen Zutaten der Diamantsynthese einen Druck von 54 000 bar aus (eine Variante des Verfahrens nutzt kugelförmige Pressen, um den allseitigen Druck gleichmäßiger aufzubringen). Elektrischer Strom heizt die Kapsel zudem auf 1400 Grad Celsius oder mehr auf.**



Ein höherer Gehalt an Stickstoff und dessen gleichmäßige Verteilung verleiht diesen synthetischen Diamanten eine intensive gelbe Farbe.



Stickstoffatome gruppieren sich in natürlichen Diamanten zu Clustern, in synthetischen platzieren sie sich einzeln oder paarweise zwischen die Kohlenstoffatome. Deshalb unterscheiden sich beide Edelsteine hinsichtlich der Wellenlängen, die sie absorbieren beziehungsweise passieren lassen.



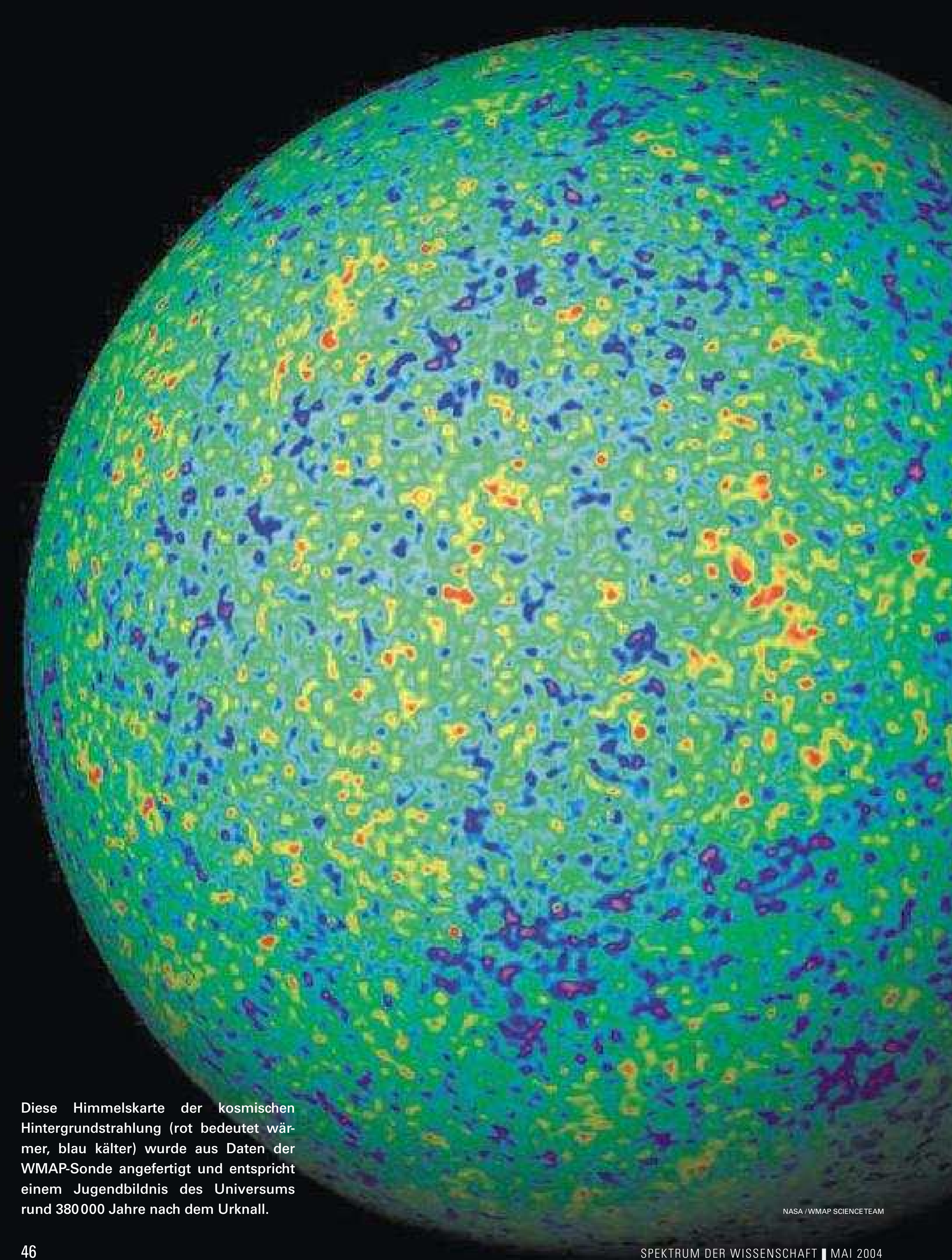
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Zirkon-»Edelsteine«** waren die ersten Diamantimitate, jedoch gelten sie nicht als synthetisches Äquivalent, da sie nicht aus Kohlenstoff bestehen. Zu ihrer Herstellung erhitzt man Zirkonoxidpulver zusammen mit anderen Stoffen wie Kalzium- und Magnesiumoxid bei Atmosphärendruck auf 2400 Grad Celsius; beim Abkühlen kristallisiert Zirkon aus.

▶ **Diamantschichten für Werkzeuge** werden chemisch aufgedampft. Dazu zerlegt ein viele Tausend Grad heißes Plasma Methan als Kohlenstofflieferant in chemisch aktive Bruchstücke. Der Kohlenstoff schlägt sich dann auf der kühleren Werkstückoberfläche nieder. Durch weitere Maßnahmen wird dabei entstehendes Graphit wieder abgetragen, sodass eine Diamantschicht verbleibt.

▶ **Vom Krematorium zum Juwelier** – ein funkelndes »Leben« nach dem Tode verspricht das amerikanische Unternehmen LifeGem. Aus der Asche des verbrannten Leichnams wird der verbliebene Kohlenstoff gewonnen und in Graphit eingebracht; daraus entsteht dann für 2000 bis 14 000 Euro je nach Größe und Qualität ein Diamant.

ILLUSTRATION: DANIELS & DANIELS / SIGANIM; MESSKURVE: ADAMAS GEMOLOGICAL LABORATORY; FOTO: GEMESIS

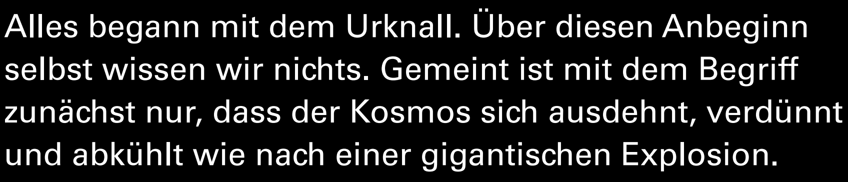


Diese Himmelskarte der kosmischen Hintergrundstrahlung (rot bedeutet wärmer, blau kälter) wurde aus Daten der WMAP-Sonde angefertigt und entspricht einem Jugendbildnis des Universums rund 380 000 Jahre nach dem Urknall.

NASA / WMAP SCIENCE TEAM



SERIE: DER BESCHLEUNIGTE KOSMOS



Neue Schlüssel zum Universum

Alles begann mit dem Urknall. Über diesen Anbeginn selbst wissen wir nichts. Gemeint ist mit dem Begriff zunächst nur, dass der Kosmos sich ausdehnt, verdünnt und abkühlt wie nach einer gigantischen Explosion.

Erst in den letzten Jahren haben die Kosmologen gelernt, feinste Spuren der dramatischen Anfänge in der kosmischen Hintergrundstrahlung zu entdecken. So wissen wir heute, dass das urtümliche Materiegemisch von Schallwellen durchquert wurde, deren Grund- und Obertöne noch heute in der Mikrowellenhintergrundstrahlung nachweisbar sind.

In kommenden Ausgaben von Spektrum der Wissenschaft sollen in drei Artikeln weitere Resultate der neuesten Kosmologie präsentiert werden – Teilantworten auf hartnäckige Rätsel. Woher stammt die großräumige Struktur des Universums mit Sternen, Galaxien, Galaxienhaufen und riesigen Filamenten? Sorgt eine geheimnisvolle Dunkle Energie für die erst vor wenigen Jahren entdeckte Beschleunigung der kosmischen Expansion? Oder verliert für größte Maßstäbe die Gravitation ein wenig von ihrer Kraft, weil verborgene Dimensionen der Raumzeit ins Spiel kommen?

Indem die neuen Entdeckungen frühere Mängel des Urknallszenarios beheben, bestärken sie das Vertrauen der Kosmologen in das Standardmodell des Universums. Doch zugleich sind neue Begriffe entstanden wie Dunkle Materie, Dunkle Energie oder Inflatonfeld – Synonyme für unser wachsendes und doch noch immer unvollständiges Wissen über die Geheimnisse des Kosmos. ◁

SERIE

Der beschleunigte Kosmos

Teil I: Die Symphonie der Schöpfung

Im Juni-Heft
Teil II: Galaktische Wände und Blasen

Im Juli-Heft
Teil III: Dunkle Energie und verborgene Dimensionen

TEIL I

Die Symphonie der Schöpfung

Neue Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen, dass das frühe Universum von harmonischen Schwingungen erfüllt war: Das urtümliche Plasma vibrierte wie Luft in einer Orgelpfeife.

Von Wayne Hu und Martin White

Im Anfang war Licht. Unter den extremen Bedingungen des frühen Universums gab die ionisierte Materie Strahlung ab, die darin gefangen blieb wie Licht in dichtem Nebel. Doch als der Kosmos expandierte und abkühlte, vereinten sich Elektronen und Protonen zu neutralen Atomen, und die Materie verlor ihre Fähigkeit, dem Licht Fesseln anzulegen. Heute, rund 14 Milliarden Jahre später, bilden die Photonen dieses großen Strahlungsausbruchs den kosmischen Mikrowellenhintergrund.

Wird ein Fernsehgerät nicht auf einen Sendekanal abgestimmt, so stammt das Flimmern auf dem Schirm zu rund einem Prozent von dieser Hintergrundstrahlung. Beim Durchmustern des Himmels nach kosmischen Mikrowellen finden die Astronomen ein Signal, das in allen Richtungen fast völlig gleich aussieht. Die Allgegenwart und Konstanz der Strahlung bedeutet, dass sie aus einer einfacheren Vergangenheit stammt – lange bevor sich Strukturen wie Sterne, Planeten und Galaxien bildeten. Wegen dieser Einfachheit können wir die Eigenschaften des Strahlungshintergrunds ungemein exakt vorhersagen und mit den immer genaueren Messungen vergleichen, die von ballon- oder weltraumgestützten Mikrowellenobservatorien geliefert werden. Damit nähern wir uns der Lösung uralter Rätsel: Woraus besteht das Universum? Wie alt ist es? Woher stammen die kosmischen Objekte, zu denen auch unser Heimatplanet gehört?

Die Astrophysiker Arno Penzias und Robert Wilson entdeckten die Hintergrundstrahlung 1965 an den AT&T Bell Laboratories in Holmdel (New Jersey), als sie nach der Quelle eines seltsamen Rauschens in ihren Radioantennen suchten. Diese Entdeckung bestätigte die Urknalltheorie, der zufolge das Universum anfangs ein heißes, dichtes Plasma aus geladenen Teilchen und Photonen war. Seit jener Zeit hat sich die Hintergrundstrahlung durch die Expansion des Kosmos abgekühlt und ist heute extrem »kalt«: Sie entspricht der Strahlung, die ein Körper bei einer Temperatur von nur 2,7 Kelvin (Grad Celsius über dem absoluten Nullpunkt) abgibt. Doch als die Strahlung entstand, war sie fast 3000 Kelvin »heiß«.

Schallwellen im frühen Universum

Im Jahr 1990 maß der Satellit Cobe *(Cosmic Background Explorer)* das Spektrum des Strahlungshintergrunds, und es zeigte genau die erwartete Form. Noch spektakulärer war die Entdeckung von kleinen lokalen Schwankungen der Strahlungstemperatur in der Größenordnung von einem hunderttausendstel Kelvin. Sie sind der Schlüssel zum Ursprung kosmischer Strukturen – zur Entwicklung von Galaxien, Sternen und Planeten aus dem urtümlichen Plasma.

Seither sind die Temperaturabweichungen immer genauer kartografiert worden. Bisheriger Höhepunkt war der Start der Sonde Wmap *(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)*, welche die Sonne 1,5 Millionen Kilometer außerhalb der Erdbahn umkreist. Wie ihre Daten zeigen, bilden die Strahlungsschwankungen ein charakteristisches Muster von heißen und kalten Flecken, das den Vorhersagen der kosmologischen Theorie entspricht. Aus den Wmap-Daten konnten die Forscher das Alter, die Zusammensetzung und die Geometrie des Universums präzise abschätzen (Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 8).

Im Prinzip verstehen wir die physikalischen Prozesse hinter den Beobachtungsdaten seit Ende der 1960er Jahre, als P. James E. Peebles von der Universität Princeton und sein Student Jer Yu erkannten, dass es im frühen Universum Schallwellen gegeben haben muss. Fast zur gleichen Zeit kamen Jakow B. Seldowitsch und Rashid A. Sunjajew vom Moskauer Institut für angewandte Mathematik zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Als die Strahlung noch von Materie gefangen war, verhielt sich das stark gekoppelte System von Photonen, Elektronen und Protonen wie ein einziges Gas, in dem die Photonen unentwegt an den Elektronen gestreut wurden, als wären sie Querschläger in einem Kugelhagel.

Wie in Luft pflanzte sich eine Störung der Gasdichte als Schallwelle fort –





Am Beginn des Universums war das urtümliche Plasma von Schallwellen erfüllt – hier durch Stimmgabeln symbolisiert.

DAVID EMMITE PHOTOGRAPHIE

als Abfolge geringfügiger Verdichtungen und Verdünnungen. Die Verdichtungen erhitzten das Gas, die Verdünnungen kühlten es ab. Folglich ergab jede Störung im frühen Universum ein Muster von Temperaturfluktuationen.

Als die Abstände im Universum bis auf ein Tausendstel ihrer heutigen Größe angewachsen waren – ungefähr 380 000 Jahre nach dem Urknall –. kühlte sich das Gas so weit ab, dass die Protonen Elektronen einfangen und Atome bilden konnten. Mit dieser Übergangsphase, der so genannten Rekombination, änderte sich die Lage dramatisch. Die Photonen wurden nicht mehr andauernd an geladenen Teilchen gestreut und konnten ziemlich ungehindert durch den Raum jagen. Da die von dichteren und heißeren Regionen abgestrahlten Photonen energiereicher waren als die aus verdünnten Regionen, wurde das durch die Schallwellen erzeugte Muster von heißen und kalten Flecken gleichsam im Strahlungshintergrund eingefroren.

Gleichzeitig wurde die Materie von dem Strahlungsdruck befreit, der bisher die Zusammenballung dichter Klumpen verhindert hatte. Nun vereinigten sich die dichteren Regionen auf Grund ihrer Schwerkraft zu Sternen und Galaxien. Tatsächlich haben die im heutigen Strahlungshintergrund beobachteten Abweichungen genau die richtige Amplitude, um die großräumigen Strukturen im Universum zu bilden.

Doch was war der erste Beweger, die Quelle der anfänglichen Störungen, aus denen Schallwellen wurden? Darauf gibt es keine einfache Antwort. Stellen Sie sich vor, Sie würden den Urknall und die anschließende Expansion beobachten. Von jedem Punkt aus könnten Sie nur eine begrenzte Region des Universums sehen – gerade so weit, wie das Licht seit dem Urknall gelangt ist. Diese Grenze der Sichtbarkeit nennen die Kosmologen den Horizont. Er wächst immer weiter, bis er den Radius des heute beobachtbaren Universums erreicht.

Lösung des Horizontproblems

Da Information nicht schneller als Licht übertragen werden kann, definiert der Horizont die Einflusssphäre jedes physikalischen Mechanismus. Gehen wir auf der Suche nach den Ursprüngen einer Struktur von bestimmter Größe in der Zeit zurück, so wird der Horizont irgendwann kleiner als die Struktur (siehe Bild S. 50). Deshalb vermag kein kausaler Vorgang die Herkunft der Struktur zu erklären.

Glücklicherweise löst die Inflationstheorie dieses Horizontproblem und liefert außerdem einen physikalischen Mechanismus für die Erzeugung der ursprünglichen Schallwellen und der Keime aller kosmischen Strukturen. Das Inflationsmodell postuliert eine neue Art Energie, deren Träger das so genannte Inflatonfeld ist; sie bewirkt in den ersten Augenblicken nach dem Urknall eine beschleunigte Expansion des Universums. Darum ist das heute beobachtbare Universum nur ein kleiner Teil des vor der Inflation beobachtbaren Alls. Außerdem werden Quantenfluktuationen des Inflatonfelds durch die rapide Expansion enorm vergrößert und liefern anfängliche Störungen, die in allen Größenmaßstäben ungefähr gleich sind. Das heißt, die kleinräumigen Störungen haben die gleiche Stärke wie die großräumigen. Diese Störungen werden zu örtlichen Fluktuationen der Energiedichte im ursprünglichen Plasma (siehe »Auf der Suche nach dem Quanten-Ursprung der Zeit« von Craig J. Hogan, Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 28).

Das detaillierte Muster der Schallwellen im Strahlungshintergrund stützt das Inflationsmodell. Da die Inflation in den ersten Augenblicken alle Dichtefluktuationen auf einmal auslöste, wurden die Phasen sämtlicher Schallwellen synchronisiert. So entstand ein Schallspektrum mit Obertönen wie bei einem Musikinstrument. Angenommen, jemand bläst in eine an beiden Enden offene Pfeife. Die Grundfrequenz entspricht einer Schallwelle mit maximaler Luftverschiebung an beiden Enden und mini- ▷

IN KÜRZE

▶ **Die kosmische Inflation** – die rapide Expansion des Universums in den ersten Augenblicken nach dem Urknall – löste Schallwellen aus, das heißt lokale Dichteschwankungen im primordialen Plasma.

▶ **Das Muster der Dichtefluktuationen** hinterließ in der kosmischen Hintergrundstrahlung gewisse Spuren, nachdem das Universum so weit abgekühlt war, dass sich neutrale Atome bilden konnten.

▶ Indem die Kosmologen diese **akustischen Signale** im Strahlungshintergrund erforschen, können sie wichtige Erkenntnisse über Geschichte und Struktur des Weltalls gewinnen. Demnach besteht das heutige Universum größtenteils aus der geheimnisvollen Dunklen Energie.

maler Verschiebung in der Mitte (siehe Kasten S. 52).

Die Wellenlänge dieser Grundschwingung ist gleich der doppelten Länge der Pfeife. Zusätzlich entsteht auch eine Reihe von Obertönen mit der Hälfte, einem Drittel, einem Viertel und so weiter der Grundwellenlänge. Das heißt, die Frequenzen der Obertöne sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Erst durch die Obertöne unterscheidet sich der Klang einer Stradivari von dem einer gewöhnlichen Geige.

Mit den Schallwellen im frühen Universum verhält es sich ebenso, nur müssen wir uns vorstellen, dass sie in der Zeit schwingen statt im Raum (siehe Kasten S. 52). In diesem Vergleich entspricht die Länge der Pfeife der Zeitspanne, in der Schallwellen durch das ursprüngliche Plasma wanderten. Die Wellen beginnen mit der Inflation und enden mit der Rekombination rund 380000 Jahre später. Angenommen, in einer bestimmten Raumregion herrscht zum Zeitpunkt der Inflation maximale positive Verschiebung, das heißt maximale Temperatur. Mit Fortpflanzung der Schallwellen beginnt die Dichte der Region zu oszillieren: Erst strebt sie zur Durchschnittstemperatur – zu minimaler Verschiebung – und dann weiter zur Minimaltemperatur oder zu maximaler negativer Verschiebung.

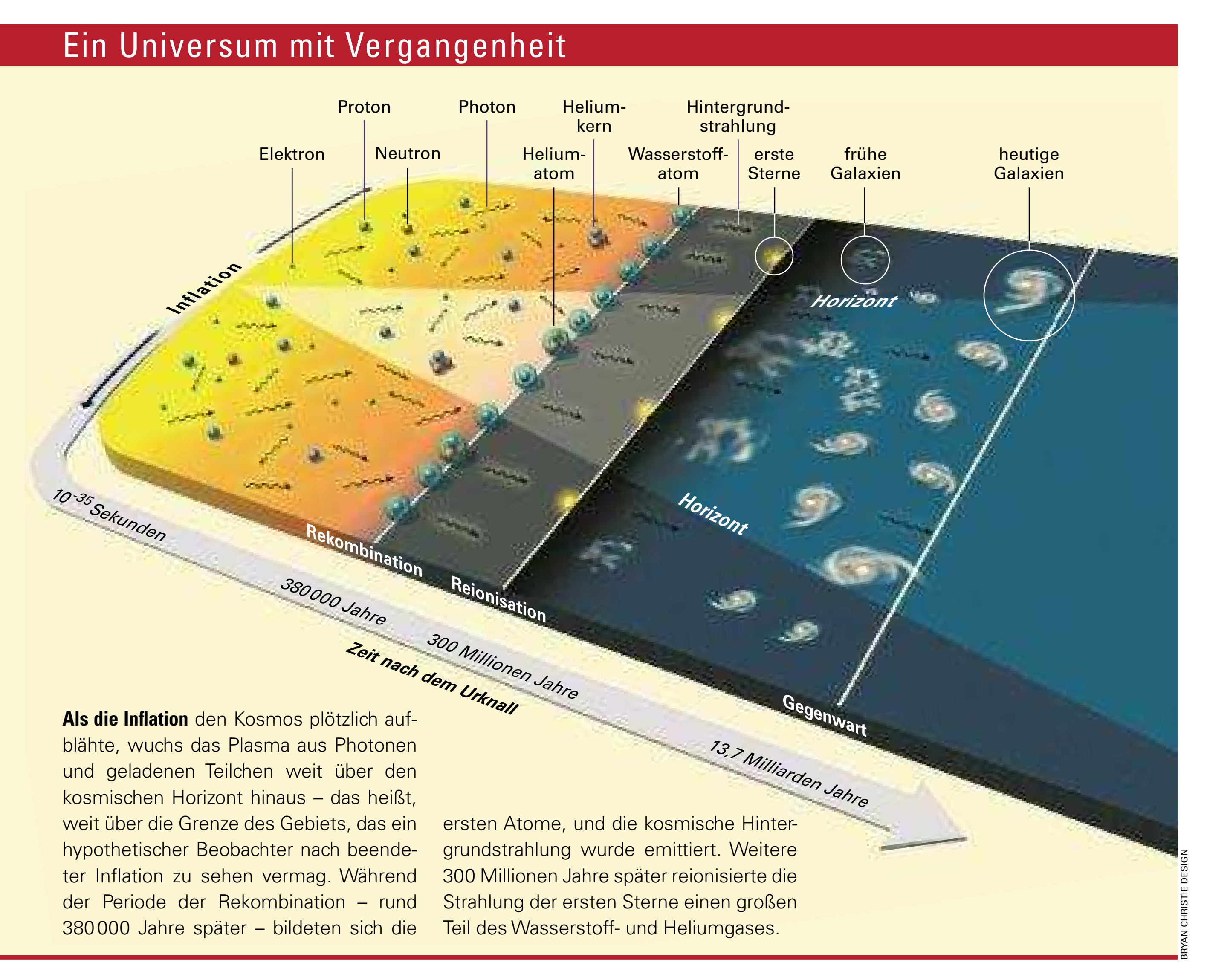
Die Welle, bei der die Region exakt zum Zeitpunkt der Rekombination die maximale negative Verschiebung erreicht, ist die Grundwelle des frühen Universums. Die Obertöne sind einfache Bruchteile der Grundwellenlänge. Indem sie zweimal, dreimal oder mehrmals so schnell schwingen wie der Grundton, rufen die Obertöne zum Zeitpunkt der Rekombination in entsprechend kleineren Raumregionen maximale positive oder negative Verschiebung hervor.

Wie leiten die Kosmologen dieses Muster aus der Hintergrundstrahlung her? Sie tragen die Stärke der Temperaturfluktuationen gegen die Größe der heißen und kalten Flecken in ein so genanntes Powerspektrum ein (siehe Kasten S. 54).

Strahlungsspuren des Ur-Schalls

Demnach erstrecken sich die Himmelsregionen mit den größten Abweichungen über ein Winkelgrad – fast das Doppelte des Vollmonddurchmessers. Zur Zeit der Rekombination hatten diese Regionen Durchmesser von rund einer Million Lichtjahre, doch durch die tausendfache Expansion des Raums ist dieser Wert seither auf eine Milliarde Lichtjahre gewachsen. Dieser erste und höchste Peak im Powerspektrum ist ein Indiz für die Grundwelle, welche die Plasmaregionen zur Zeit der Rekombination maximal verdichtet oder verdünnt hat.

Ein Universum mit Vergangenheit



Als die Inflation den Kosmos plötzlich aufblähte, wuchs das Plasma aus Photonen und geladenen Teilchen weit über den kosmischen Horizont hinaus – das heißt, weit über die Grenze des Gebiets, das ein hypothetischer Beobachter nach beendeter Inflation zu sehen vermag. Während der Periode der Rekombination – rund 380000 Jahre später – bildeten sich die ersten Atome, und die kosmische Hintergrundstrahlung wurde emittiert. Weitere 300 Millionen Jahre später reionisierte die Strahlung der ersten Sterne einen großen Teil des Wasserstoff- und Heliumgases.

Die nachfolgenden Peaks im Powerspektrum repräsentieren die von den Obertönen erzeugten Temperaturunterschiede. Die Abfolge der Peaks ist ein deutliches Indiz dafür, dass die Inflation alle Schallwellen gleichzeitig ausgelöst hat. Wären die Störungen sukzessive im Laufe der Zeit erzeugt worden, würde das Powerspektrum nicht so harmonisch geordnet sein. Um zu unserem musikalischen Vergleich zurückzukehren: Man stelle sich die Kakophonie vor, die eine Flöte mit zufällig verteilten Löchern erzeugt.

Die Inflationstheorie sagt auch voraus, dass die Schallwellen in allen Größenmaßstäben ungefähr die gleiche Amplitude haben sollten. Doch das Powerspektrum zeigt nach dem dritten Peak einen starken Abfall in der Stärke der Temperaturfluktuationen. Diese Diskrepanz lässt sich dadurch erklären, dass kurzwellige Schallwellen zerlaufen. Da der Schall sich durch Teilchenkollisionen im Plasma fortpflanzt, kommt eine Welle zum Erliegen, wenn ihre Wellenlänge kleiner ist als die typische Weglänge zwischen Teilchenkollisionen. In Luft beträgt diese Distanz nur 10^{-5} Zentimeter und ist vernachlässigbar. Doch im primordialen Plasma legte ein Teilchen kurz vor der Rekombination typischerweise einige 10 000 Lichtjahre zurück, bevor es auf ein anderes traf. Denn »dicht« war das Universum zu jener Zeit nur im Vergleich zum heutigen Kosmos, in dem die Materie ungefähr eine Milliarde Mal dünner verteilt ist als damals. Heute, nach der tausendfachen Expansion, entspricht diese Weglänge rund zehn Millionen Lichtjahren. Daher sind die Amplituden der Peaks im Powerspektrum unterhalb des rund Zehnfachen dieser Größenordnung gedämpft.

Wie ein Musiker, der eine Spitzenvioline von einer gewöhnlichen Fiedel durch den Reichtum der Obertöne zu unterscheiden vermag, können Kosmologen von der Grundfrequenz der primordialen Schallwellen und der Stärke der Obertöne auf Form und Zusammensetzung des Universums schließen. Der Mikrowellenhintergrund verrät die Winkelgröße der stärksten Temperaturfluktuationen – das heißt, wie groß diese heißen und kalten Flecken am Himmel erscheinen –, und das wiederum verrät uns die Grundfrequenz der urtümlichen Schallwellen. Da die Kosmologen die Schallgeschwindigkeit im ursprünglichen Plasma kennen, können sie die



Größe der Welle zum Zeitpunkt der Rekombination sehr genau abschätzen. Ebenso lässt sich die Entfernung berechnen, welche die Photonen der Hintergrundstrahlung zurückgelegt haben, bevor sie die Erde erreichten – nämlich 45 Milliarden Lichtjahre. Zwar haben die Photonen dafür nur rund 14 Milliarden Jahre Zeit gehabt, aber die Expansion des Weltraums hat ihren Weg entsprechend verlängert.

Ein absolut flaches Universum

Damit wissen die Kosmologen alles über das Dreieck, dass durch die Schallwelle und unseren Beobachtungspunkt aufgespannt wird; sie können nachprüfen, ob die Winkelsumme 180 Grad beträgt – der klassische Test für Raumkrümmung. Diese Rechnung lässt sich sehr präzise durchführen und zeigt, dass das Universum – abgesehen von seiner Expansion im Großen – den Gesetzen der Euklidischen Geometrie gehorcht und somit fast absolut flach ist. Da die Geometrie des Kosmos von seiner Energiedichte abhängt, folgt daraus, dass die mittlere Energiedichte nahe bei der so genannten kritischen Dichte von rund 10^{-29} Gramm pro Kubikzentimeter liegen muss.

Als nächstes wollen die Kosmologen die genaue Zusammensetzung der Materie und Energie im Weltall wissen. Auskunft darüber geben die Amplituden der Oberschwingungen, denn während normale Schallwellen nur vom Gasdruck abhängen, wurden die Wellen im frühen Universum durch die Schwerkraft beeinflusst. Die Gravitation komprimiert das Gas in dichteren Regionen und kann je nach der Phase der Schallwelle die Verdichtung oder Verdünnung entweder verstärken oder abschwächen. Aus der Modulation der Wellen ergibt sich die Stärke der Schwerkraft, die wiederum anzeigt, wie das Medium aus Materie und Energie zusammengesetzt ist.

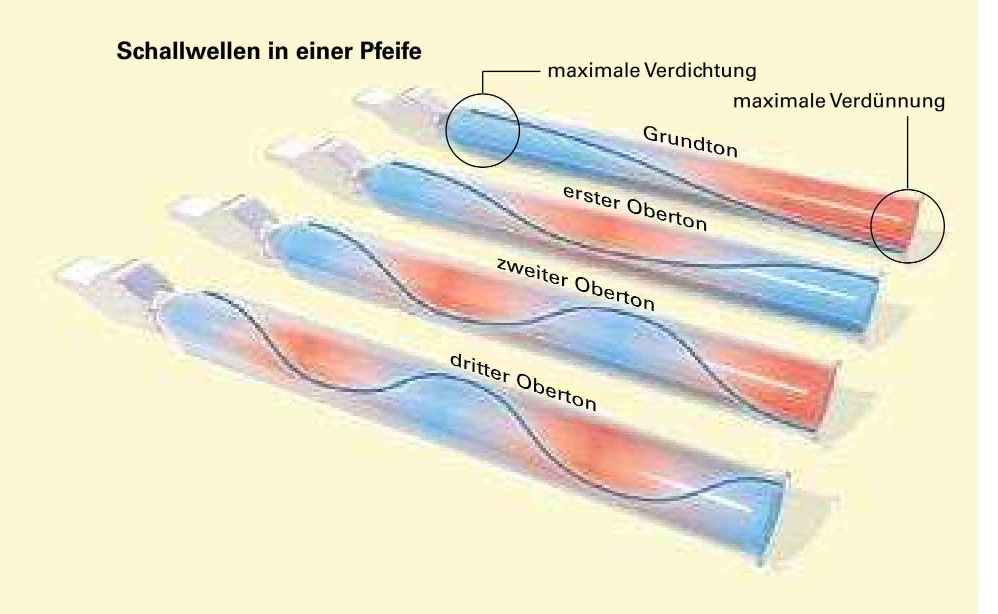
Damals wie heute gab es zwei Grundtypen von Materie: Baryonen – Protonen und Neutronen –, die den größten Teil der normalen Materie ausmachen, sowie Kalte Dunkle Materie, die zwar Schwerkraft ausübt, aber mit normaler Materie oder Licht nicht merklich wechselwirkt und darum bisher noch nie direkt beobachtet wurde (siehe »Die Suche nach Dunkler Materie« von David B. Cline, Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 44). Beide Materiesorten verleihen dem primordialen Plasma Masse und verstärken die Gravitationsanziehung, aber nur die normale Materie unterliegt den Verdichtungen und Verdünnungen der Schallwellen. Zur Rekombinationszeit wird die Grundschwingung in einer Phase eingefroren, bei der die Gravitation die dichteren Regionen zusätzlich komprimiert (siehe Kasten S. 55). Doch der erste Oberton mit halber Grundwellenlänge friert in der entgegengesetzten Phase ein: Die Schwerkraft versucht das Gas zu komprimieren, während der Gasdruck es auseinander zu treiben sucht. Infolgedessen sind die vom ersten Oberton ausgelösten Temperaturfluktuationen weniger ausgeprägt als diejenigen, die von der Grundschwingung stammen.

Dieser Effekt erklärt, warum der zweite Peak im Powerspektrum niedriger ▷

Kosmische Harmonielehre

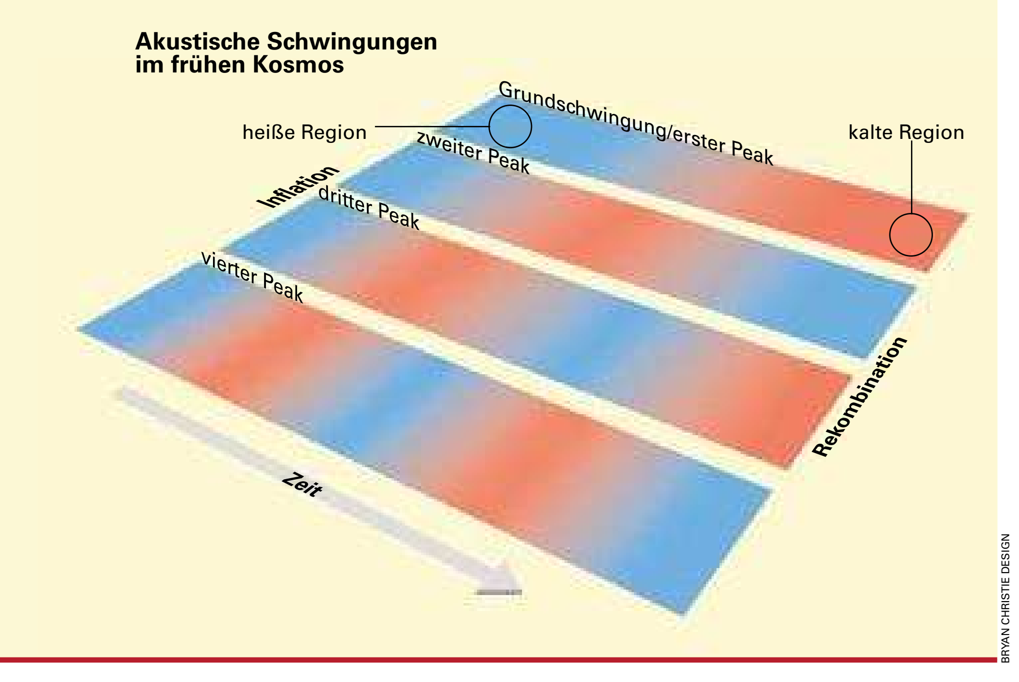
Das Schallspektrum des frühen Universums enthielt – wie das eines Musikinstruments – zahlreiche Obertöne. Wenn man in eine offene Pfeife bläst, entspricht der Grundton einer Welle mit maximaler Luftverdichtung (blau) am Mundstück und maximaler Verdünnung (rot) am Ende der Pfeife. Zusätzlich entsteht eine Reihe von Obertönen mit kürzeren Wellenlängen, die einfache Brüche – ein Halbes, ein Drittel, ein Viertel und so fort – der Grundwellenlänge sind.

Schallwellen in einer Pfeife



Schallwellen oszillierten auch im Plasma des frühen Universums. Nach der Phase der Inflation verdichtete die Grundwelle einige Regionen des Plasmas und verdünnte andere.
Dadurch erreichte die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung zur Zeit der Rekombination dort Maxima (blau) und Minima (rot). Die Obertöne schwangen zwei, drei oder mehrere Male so schnell, wodurch auch kleinere Regionen des Strahlungshintergrunds zur Zeit der Rekombination maximale und minimale Temperaturen aufwiesen.

Akustische Schwingungen im frühen Kosmos



BRYAN CHRISTIE DESIGN

▷ ist als der erste. Durch Vergleich der beiden Peaks können die Kosmologen auf die relative Stärke von Schwerkraft und Gasdruck im frühen Universum schließen. Demnach hatten die Baryonen zur Rekombinationszeit ungefähr dieselbe Energiedichte wie die Photonen und liefern darum heutzutage zirka fünf Prozent der kritischen Dichte. Dieses Ergebnis stimmt fast perfekt mit der Zahl überein, die aus der Synthese der leichten Elemente durch Kernreaktionen im jungen Universum hergeleitet wird.

Doch nach der Allgemeinen Relativitätstheorie wirkt nicht nur Materie, sondern auch Energie anziehend. Hat also auch die Schwerkraft der Photonen die frühen Temperaturfluktuationen beeinflusst? Tatsächlich gab es diesen Effekt, doch ein anderer glich ihn wieder aus: Nach der Rekombination verloren die aus dichteren Regionen stammenden Photonen mehr Energie als die aus dünneren Gebieten, weil sie stärkere Gravitationskräfte überwinden mussten.

Dieser so genannte Sachs-Wolfe-Effekt reduzierte die Amplitude der Temperaturschwankungen im Strahlungshintergrund und machte damit die Verstärkung durch die Schwerkraft der Photonen exakt zunichte. In den Gebieten des frühen Alls, die für akustische Oszillationen zu groß waren – das heißt, die heute mehr als ein Winkelgrad am Himmel überdecken – sind die Temperaturvariationen einzig dem Sachs-Wolfe-Effekt geschuldet. In diesem Größenmaßstab repräsentieren heiße Flecken des Hintergrunds paradoxerweise weniger dichte Regionen des Universums.

Einsteins Idee von 1917

Schließlich können die Kosmologen aus der Hintergrundstrahlung den Prozentsatz Dunkler Materie im Kosmos bestimmen. Die Schwerkraft der Baryonen allein hätte die Temperaturvariationen nicht viel weiter als bis zum ersten Peak des Powerspektrums modulieren können. Nur eine große Menge Kalter Dunkler Materie vermag die Gravitationskräfte genügend stark zu machen. Aus den relativen Höhen der ersten drei Peaks lässt sich schließen, dass die Dichte der Kalten Dunklen Materie ungefähr das Fünffache der Baryonendichte betragen muss.

Somit trägt die Dunkle Materie heutzutage rund 25 Prozent zur kritischen Dichte bei. Leider klafft in diesen

Berechnungen für Masse und Energie des heutigen Universums eine riesige Lücke: Was ist mit den restlichen siebzig Prozent der kritischen Dichte?

Um diese Kluft zu schließen, haben Theoretiker eine geheimnisvolle Dunkle Energie postuliert, deren relativer Einfluss mit der Expansion des Kosmos zugenommen haben soll. Somit werden wir zu der unwahrscheinlichen Schlussfolgerung gezwungen, dass das heutige Universum größtenteils aus unsichtbarer Dunkler Materie und Dunkler Energie besteht. Noch dazu scheint die Energiedichte von Dunkler Materie und Dunkler Energie heute zufälligerweise ähnlich groß zu sein, obwohl Erstere zur Zeit der Rekombination extrem stark überwog. Physiker mögen Zufälle nicht; sie bevorzugen als Erklärung Ursache und Wirkung. Zu allem Überfluss dominierte im frühesten Universum eine weitere geheimnisvolle Komponente – das Inflaton – und legte die Saat für kosmische Strukturen. Warum sollen wir einem kosmologischen Modell Glauben schenken, das auf der scheinbar willkürlichen Einführung von drei derart rätselhaften Wesenheiten beruht?

Ein Grund ist, dass diese drei Zutaten zahlreiche bereits zuvor bekannte Fakten erklären. Die Dunkle Materie wurde erstmals in den 1930er Jahren postuliert, um Messwerte der lokalen Massendichte in Galaxienhaufen zu interpretieren. Die Idee der Dunklen Energie geht auf Albert Einstein zurück, der 1917 in seine Gleichungen eine der Gravitation entgegenwirkende kosmologische Konstante einbaute. Einstein verwarf diese Idee bald wieder, doch in den 1990er Jahren erlebte sie ein Comeback, denn die Beobachtung weit entfernter Supernovae zeigte, dass sich die Expansion des Kosmos beschleunigt. Die aus dem Mikrowellenhintergrund hergeleiteten Energiedichten von Dunkler Materie und Dunkler Energie stimmen mit diesen astronomischen Beobachtungen verblüffend gut überein (Spektrum der Wissenschaft 12/2003, S. 28).

Überdies lassen sich aus dem kosmologischen Standardmodell nachprüfbare Vorhersagen folgern. Joseph Silk – heute an der Universität Oxford tätig – sagte 1968 voraus, dass die kleinräumigen akustischen Peaks im Strahlungshintergrund auf eine bestimmte Weise gedämpft sein müssten. Infolgedessen sollte die zugehörige Strahlung in geringem, aber genau bekanntem Maß polarisiert werden, das heißt in bevorzugten Richtungen schwingen. Man würde eigentlich annehmen, dass die Hintergrundstrahlung nicht polarisiert ist, weil die Streuung der Photonen im primordialen Plasma ihre Schwingungsrichtung ganz zufällig verteilt hat.

Spuren der Dunklen Energie

Aber in den kleinen Größenmaßstäben, bei denen Dämpfung eintritt, erleiden die Photonen relativ wenige Streuungen und behalten Richtungsinformation bei, die sich dem heutigen Mikrowellenhintergrund als Polarisation aufgeprägt hat. Diese »akustische Polarisation« wurde vom Degree Angular Scale Interferometer, das auf der Amundsen-Scott-Südpolstation betrieben wird, und später auch von Wmap gemessen – in schöner Übereinstimmung mit den Vorhersagen. Wmap entdeckte allerdings auch Polarisation in größeren Winkelbereichen, verursacht durch Streuung von Hintergrund-Photonen nach der Rekombination (siehe Kasten unten).

Außerdem beginnen die Forscher im Strahlungshintergrund Phänomene zu beobachten, die nur aus der Existenz der Dunklen Energie zu erklären sind. Weil die Dunkle Energie die Expansion des Universums beschleunigt, schwächt sie die Gravitationskräfte, die bei der Entstehung von Galaxienhaufen im Spiel sind. Ein Photon, das ein solches Gravitationsgebiet durchquert, gewinnt bei der Annäherung Energie, doch wenn es sich wieder entfernt, bekommt es nur die unterdessen etwas geschwächte Schwerkraft zu spüren und verliert darum weniger Energie, als es vorher gewonnen hat. Dieser integrierte Sachs-Wolfe-Effekt verursacht großräumige Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund. Astronomen haben vor kurzem Hinweise auf dieses Phänomen gefunden, als sie großräumige Strukturen in der Galaxienvertei- ▷

Missklang in den Beobachtungsdaten

380000 Jahre nach dem Urknall wanderten die meisten Photonen ungestört durch das Universum; doch einige kollidierten mit geladenen Teilchen, wodurch die Strahlung über große Himmelsbereiche hinweg polarisiert wurde. Die durch die Wmap-Sonde gewonnenen Daten dieser großräumigen Polarisation ergeben, dass rund 17 Prozent der Hintergrundphotonen einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall von einem dünnen Nebel ionisierten Gases gestreut wurden.

Dieser relativ hohe Anteil ist die größte Überraschung in den Wmap-Daten. Zuvor hatten die Kosmologen angenommen, Wasserstoff und Helium seien größtenteils durch die Strahlung der ersten – extrem massereichen und hellen – Sterne ionisiert worden. Dieser Vorgang heißt Reionisation, weil er die Gase wieder in den Plasmazustand versetzte, der vor der Emission der Hintergrundstrahlung geherrscht hatte. Die Theoretiker vermuteten, dies habe fast eine Milliarde Jahre nach dem Urknall stattgefunden, und darum seien nur rund fünf Prozent der Hintergrundphotonen gestreut worden. Der höhere Prozentsatz, der aus den Wmap-Daten folgt, bedeutet eine viel frühere Reionisation und stellt die Modelle für die Entstehung der ersten Sterne in Frage. Sogar eine zentrale Aussage der Inflationstheorie, wonach die anfänglichen Dichtefluktuationen in allen Größenmaßstäben fast gleich stark gewesen seien, gerät ins Wanken. Wenn die kleinräumigen Fluktuationen höhere Amplituden hatten, könnten die ersten Sterne früher entstanden sein.

Die Wmap-Daten enthalten einen weiteren Hinweis auf eine Abweichung von dieser Skaleninvarianz. In den größten Maßstäben, die Himmelsbereichen von mehr als 60 Grad entsprechen, fand Wmap einen seltsamen Mangel an Temperaturunterschieden im Strahlungshintergrund. Einige Theoretiker meinen, die Abweichung weise auf einen grundlegenden Mangel unserer Modelle für Inflation, Dunkle Energie oder die Topologie des Universums hin.


NASA / WMAP SCIENCE TEAM

Die ersten Sterne reionisierten das umgebende Gas.

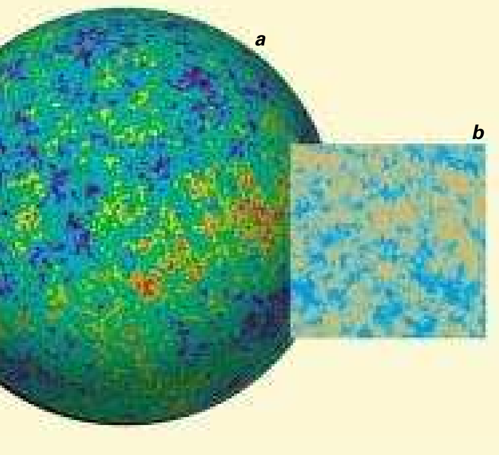
▷ lung mit den Wmap-Daten verglichen. Die für die großräumigen Temperaturabweichungen erforderliche Menge an Dunkler Energie stimmt mit dem Betrag überein, der aus den akustischen Peaks und den weit entfernten Supernovae hergeleitet wurde. Mit noch besseren Daten aus den Galaxiendurchmusterungen könnte der integrierte Sachs-Wolfe-Effekt eine wichtige Informationsquelle über die Dunkle Energie werden.

Besonders interessant ist die Frage, in welchem Energiebereich die Inflation eigentlich stattfand. Zum Beispiel glauben die Physiker, dass die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung anfangs, als das Universum heißer war als 10^{15} Kelvin, zu einer einzigen elektroschwachen Wechselwirkung vereinigt waren. Falls die Inflation in diesem Energiebereich vor sich ging, würde dies auf einen engen Zusammenhang zwischen Inflatonfeld und elektroschwacher Vereinigung hinweisen. Wenn die Inflation hingegen bei den viel höheren Temperaturen stattfand, die eine Verschmelzung von elektroschwacher und starker Wechselwirkung zulassen, hinge die Inflation wohl mit der Großen Vereinigung dieser Naturkräfte zusammen.

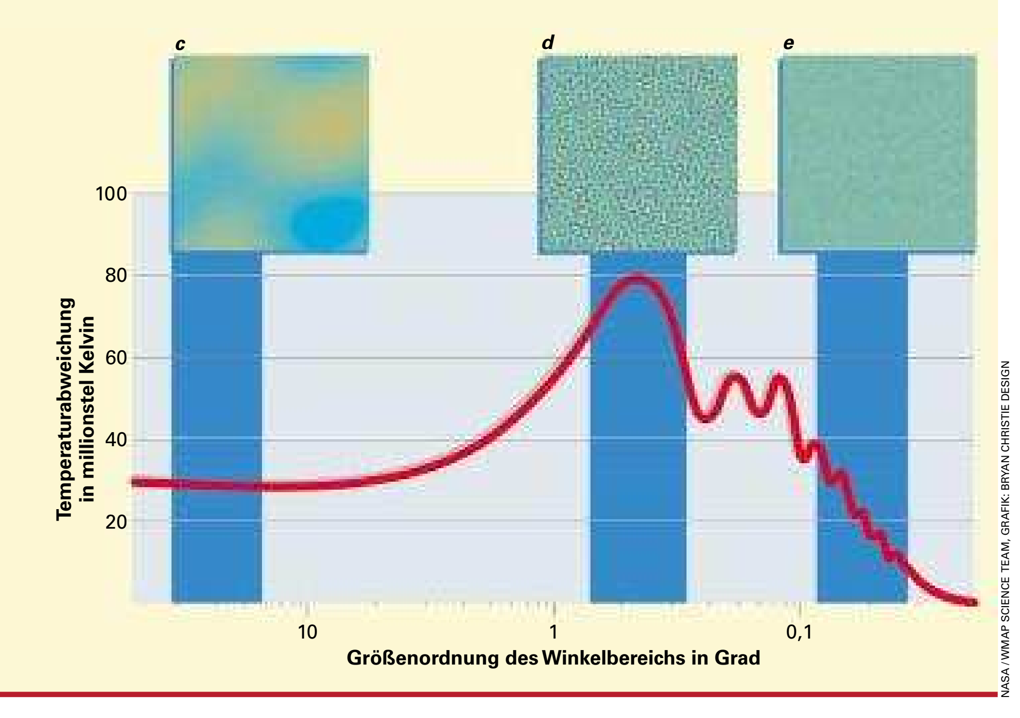
Ein bestimmtes Merkmal der Hintergrundstrahlung könnte die Antwort auf diese Frage liefern. Die Inflation bringt nicht nur Dichtefluktuationen hervor, sondern auch Schwingungen der Raumzeit selbst – das heißt Gravitationswellen, deren Wellenlänge sich über das gesamte beobachtbare Universum erstrecken kann. Deren Amplitude ist proportional zum Quadrat des Energiebereichs, in dem die Inflation stattfindet. Falls die Inflation bei den hohen Energien der Großen Vereinigung geschah, sollten davon Spuren in der Polarisation des Strahlungshintergrunds künden.

Schließlich könnten weitere Beobachtungen der Hintergrundstrahlung auch Auskunft über das physikalische Wesen der Dunklen Energie geben. Sie ist vielleicht, wie schon Einstein vermutete, eine Art Vakuumenergie – doch dann müsste sie wenigstens 60 und vielleicht sogar 120 Größenordnungen kleiner sein als die von der Teilchenphysik vorhergesagte Vakuumenergie. Und warum sind die Dichte der Dunklen Energie und die der Dunklen Materie jetzt – und anscheinend nur jetzt – ungefähr gleich groß? Um diese Fragen zu beantworten, können die Forscher von der Tatsache profitieren, dass die Photonen der Hintergrundstrahlung Strukturen im gesamten Universum ausleuchten.

Kosmische Grund- und Obertöne



Detailmessungen des Strahlungshintergrunds liefern eine Himmelskarte der Temperaturschwankungen *(a)*. Für die Analyse eines Kartenausschnitts *(b)* verwenden die Forscher Bandfilter, um herauszufinden, wie die Temperatur der Strahlung in unterschiedlichen Größenmaßstäben variiert. Die Abweichungen sind im Großen – für Himmelsregionen, die sich über rund 30 Grad erstrecken – kaum zu erkennen *(c)*. Ähnliches gilt für sehr kleine Größenordnungen oder Winkelbereiche von rund einem zehntel Grad *(e)*. Doch für ungefähr ein Grad große Himmelsgebiete *(d)* sind die Unterschiede deutlich ausgeprägt. Dieser erste Peak im Powerspektrum (unten) zeigt die von der Grundschwingung des frühen Universums verursachten Verdichtungen und Verdünnungen an. Die nachfolgenden Peaks entsprechen kosmischen Obertönen.



NASA / WMAP SCIENCE TEAM, GRAFIK: BRYAN CHRISTIE DESIGN

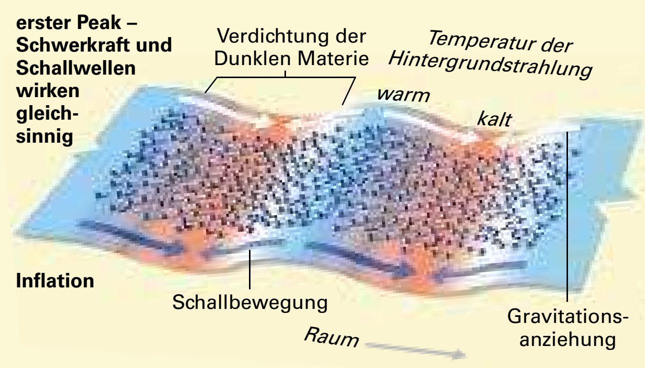
Die Spur der Dunklen Energie

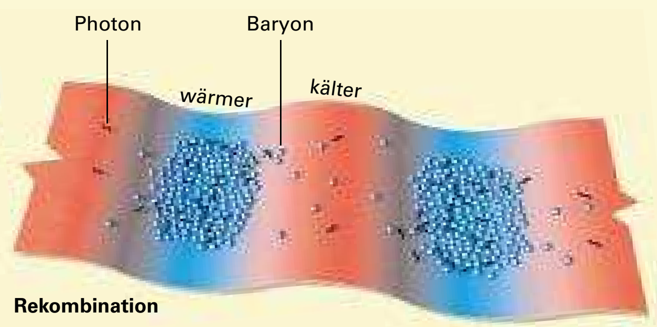
Indem der Strahlungshintergrund die Amplitude der Dichtefluktuationen zu verschiedenen Zeiten der kosmischen Geschichte anzeigt, vermag er den Widerstreit zwischen Materie und Dunkler Energie zu erhellen. Zwei Phänomene könnten dabei besonders hilfreich sein. Das erste ist der Sunjajew-Seldowitsch-Effekt; er tritt auf, wenn Photonen der Hintergrundstrahlung an dem heißen ionisierten Gas in Galaxienhaufen gestreut werden. Mit diesem Effekt lassen sich Galaxienhaufen während der entscheidenden Phase vor ungefähr fünf Milliarden Jahren identifizieren, als die Dunkle Energie die Expansion des Kosmos zu beschleunigen begann. Die Anzahl der Galaxienhaufen wiederum zeigt die Amplitude der Dichtefluktuationen zu jener Zeit an.

Das zweite Phänomen ist der Gravitationslinseneffekt, der auftritt, wenn Hintergrundphotonen eine besonders massereiche Struktur passieren. Eine Gravitationslinse beugt die Photonenbahnen und verzerrt dadurch das Muster der Temperatur- und Polarisationsunter-

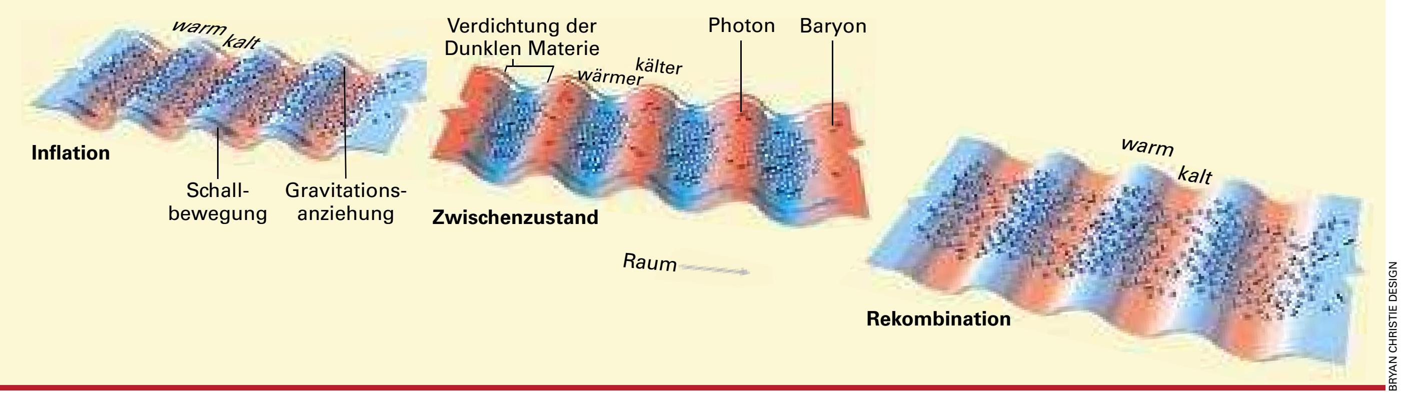
Schallmodulation durch die Schwerkraft der Dunklen Materie

Der Einfluss der Dunklen Materie moduliert die akustischen Signale im Strahlungshintergrund. Nach der Inflation ziehen dichtere Regionen der Dunklen Materie, die von gleicher Größenordnung sind wie die akustische Grundwelle, durch ihre Schwerkraft – dargestellt durch Potenzialmulden – Baryonen und Photonen an. Die Gravitation senkt die Temperatur von entweichenden Photonen, darum sind die Mulden rot dargestellt. Zur Zeit der Rekombination, rund 380000 Jahre später, wirken Schwerkraft und Schallbewegung so zusammen, dass die Temperatur in den Mulden erhöht wird (blau), während sie dazwischen abgesenkt wird (rot).





Bei den kleineren **Obertonwellenlängen** arbeiten Gravitation und Schalldruck manchmal gegeneinander. Klumpen Dunkler Materie, die einer Schallwelle des zweiten Peaks entsprechen, maximieren die Strahlungstemperatur in den Mulden schon lange vor der Rekombination. Nach diesem Zwischenzustand treibt der Gasdruck die Baryonen und Photonen aus den Mulden (blaue Pfeile), während die Gravitation sie zurückzuziehen sucht (weiße Pfeile). Dieser Widerstreit vermindert die Temperaturunterschiede. Das erklärt, warum der zweite Peak im Powerspektrum niedriger ist als der erste.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

schiede. Die Stärke des Linseneffekts ergibt die Amplitude der entsprechenden Massendichtefluktuationen.

Für solche Untersuchungen von Inflation und Dunkler Energie brauchen die Forscher allerdings eine neue Generation von Teleskopen, welche die kosmische Hintergrundstrahlung mit noch größerer Empfindlichkeit und Auflösung auszumessen vermögen. Die Europäische Weltraumorganisation Esa plant für 2007 den Start der Planck-Sonde; dieses Mikrowellenobservatorium soll die gleiche Umlaufbahn beschreiben wie Wmap. Die Planck-Sonde wird im Strahlungshintergrund Temperaturunterschiede bis zu fünf Millionstel Kelvin aufspüren sowie Flecken auflösen, die sich über weniger als ein zehntel Grad erstrecken.

Diese Messungen werden uns einen Überblick über die gesamte Bandbreite der akustischen Schwingungen im Mikrowellenhintergrund verschaffen und ein schärferes Bild des inflationären Spektrums ermöglichen. Zudem sind zahlreiche bodengestützte Experimente in Vorbereitung, um kosmische Strukturen in der gegenwärtigen Phase der beschleunigten Expansion zu untersuchen.

Zwar scheint das kosmologische Standardmodell als phänomenologische Beschreibung des Universums erstaunlich gut zu funktionieren, doch seine dunklen Seiten werden sich erst im Licht künftiger Experimente erhellen lassen. Klar ist jedenfalls, dass die kosmische Symphonie ihre Zuhörer noch lange bezaubern wird. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE




Wayne Hu ist Associate Professor für Astronomie und Astrophysik an der Universität Chicago. Seine Forschungsschwerpunkte sind Dunkle Materie, Dunkle Energie und Strukturbildung im Universum. **Martin White** ist Professor für Astronomie und Physik an der Universität von Kalifornien in Berkeley. Er interessiert sich für die Verbindungen zwischen Astrophysik und Grundlagenphysik.

Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts. Von Alan H. Guth. Droemer Knaur, München 2002

Das Echo der Zeit. Von George Smoot und Keay Davidson. Bertelsmann, München 1995

3K: The cosmic microwave background radiation. Von R. B. Partridge. Cambridge University Press, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Im Wandel der Gezeiten

Wie Seefahrer und Gelehrte im Laufe der Jahrhunderte das geophysikalische Phänomen Ebbe und Flut zu erklären und vorauszuberechnen suchten

Von Albrecht Sauer

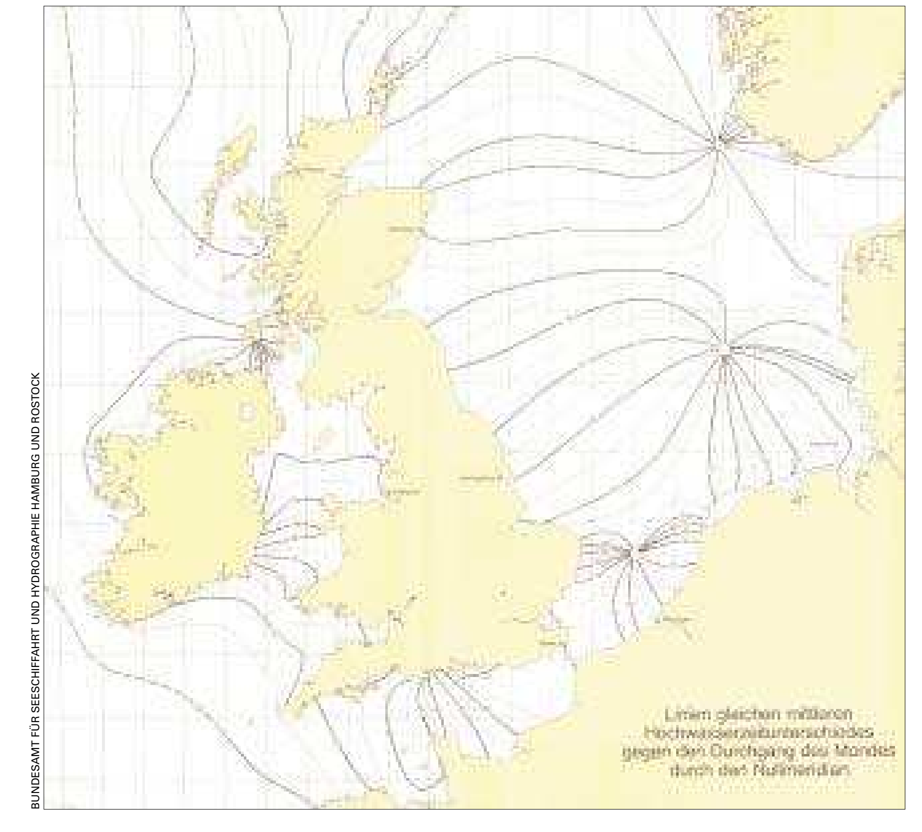
Eigentlich kreist der Mond gar nicht um die Erde, sondern beide Himmelskörper drehen sich umeinander! Solche und andere mitunter erstaunlichen Schlüsselerkenntnisse nehmen die Besucher des Ausstellungsbereichs »Gezeiten« im Deutschen Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven mit nach Hause. Denn obwohl die astronomischen und geophysikalischen Ursachen der Gezeiten schon in der Schule gelehrt werden, können die wenigsten Nordseeurlauber das ihnen im Umfeld des Museums begegnende Naturphänomen korrekt erklären. Das jedoch ist gewiss nicht nur eine Bildungsfrage – selbst Fachwissenschaftler haben die Komplexität der Gezeiten und ihrer Ursachen jahrhundertelang unterschätzt.

Der augenfällige Zusammenhang des rhythmischen Steigens und Fallens des Meeresspiegels mit dem täglichen scheinbaren Umlauf des Mondes am Firmament ist schon seit der Antike bekannt – und zwar nicht nur unter Seefahrern und Küstenbewohnern, sondern ebenso in der Gelehrtenwelt. Auch mittelalterliche Autoren, etwa der spanische Bischof Isidor von Sevilla (um 560–636) und insbesondere der angelsächsische Benediktinermönch Beda Venerabilis (um 672/73–735), setzten sich mit dem Phänomen auseinander. Beda, der im ostenglischen Kloster Jarrow am River Tyne lebte, kannte sich infolge seiner kalendarischen Berechnungen des Osterdatums bestens mit den Mondzyklen aus. Er beschrieb nicht nur, wie Hoch- und Niedrigwasser von Tag zu Tag später eintreten, sondern auch, wie die Gezeitenhöhe im halbmonatlichen Rhythmus zwischen Spring- und Nippzeit schwankt.



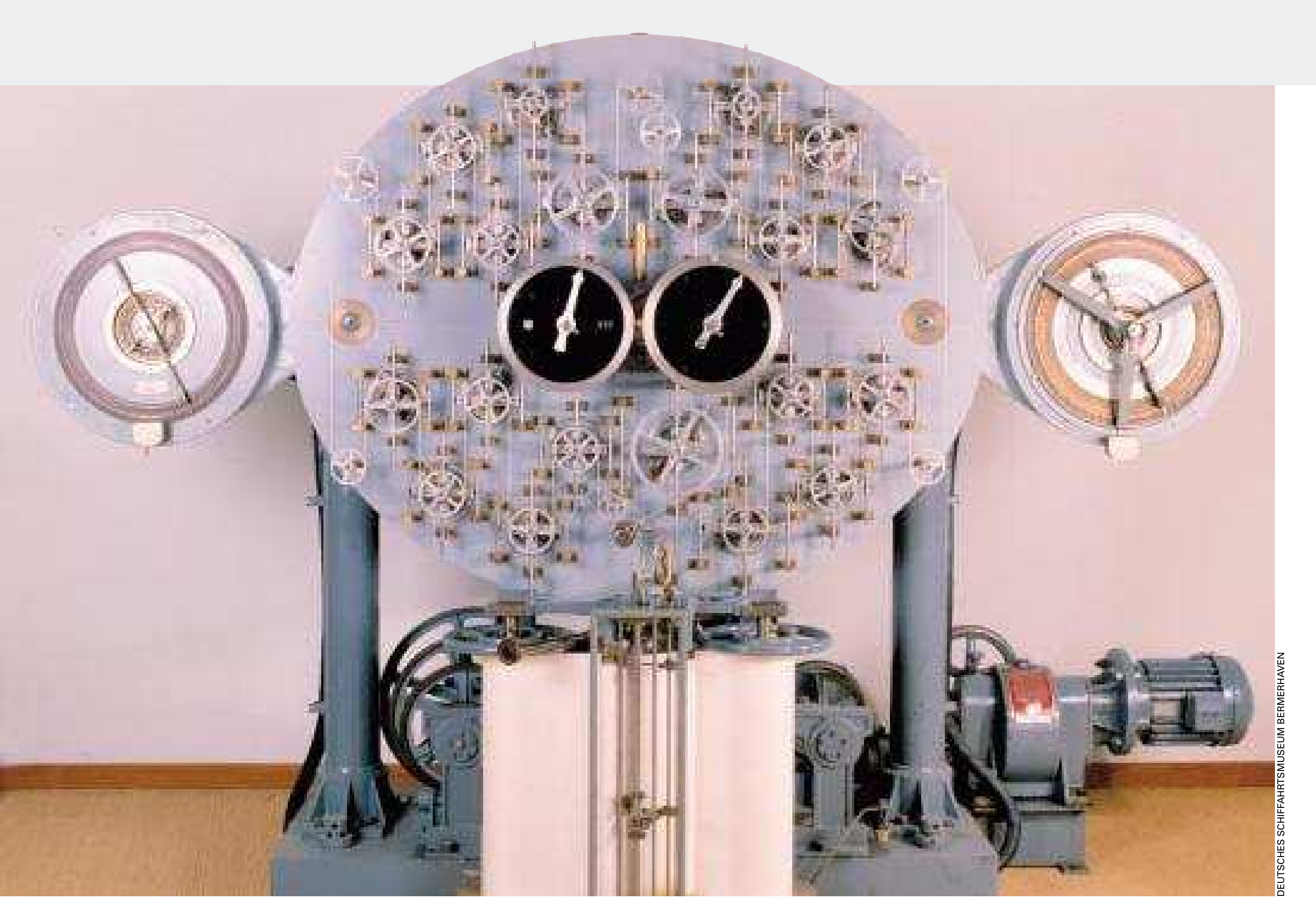
Wie macht der Mond das nur?

Freilich konnten alle Bemühungen vor Johannes Kepler (1571–1630) und Isaac Newton (1642–1727) wohl einen Zusammenhang feststellen, ihn aber nicht deuten. Denn ohne Kenntnis der Planetenbewegungen und des Gravitationsgesetzes fehlte allen Erklärungsversuchen das theoretische Fundament.



BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFAHRT UND HYDROGRAPHIE HAMBURG UND ROSTOCK

In der Nordsee entstehen durch Überlagerung der Gezeitenströme drei kreisförmig umlaufende Bewegungen, so genannte amphidromische Systeme. Die in der Karte eingezeichneten Linien verbinden die Orte mit gleichem mittlerem Hochwasserzeitunterschied gegen den Durchgang des Mondes durch den Meridian von Greenwich. In jedem System umkreist die Gezeitenwelle einen gezeitenlosen Mittelpunkt.



Die erste deutsche Analogrechenmaschine zur Vorausberechnung der Gezeiten stammt aus dem Jahre 1916. Sie wurde im Geheimauftrag des Reichsmarineamtes für den U-Boot-Krieg gegen Großbritannien gebaut. Ihre 20 Tidengetriebe errechneten die Jahresdaten eines Hafens in etwa zwölf Stunden.

In der Seefahrt, wo man gezwungenermaßen zu einer praktikablen Lösung der Gezeitenvorausberechnung finden musste, behalf man sich mit einer Methode, die nach heutigen Maßstäben kaum als hinreichend gelten kann: Man peilte den Mond an, wenn am Ort der Vorhersage Hochwasser war, und merkte sich seine Position und die gemessene »Hafenzeit«. Fortan konnte man sich mit einem schlichten Blick zum Firmament und auf den Peilkompass über den ungefähren Stand der Gezeit informieren. War der Erdtrabant nicht sichtbar, zog man statt seiner die Sonne heran. Für jeden seit Voll- oder Neumond vergangenen Tag – das so genannte Mondalter – zählte man einen der 32 Striche des Kompasses zur notierten Hafenzeit hinzu, um damit auf die Sonnenpeilung zur Hochwasserzeit zu kommen.

Man setzte hierdurch zwar reichlich großzügig die 32 Kompassstriche den knapp 30 Tagen des Mondumlaufs – des synodischen Monats – gleich, aber die Einfachheit des Verfahrens und die Gewohnheit, ohnehin den so gewonnenen Berechnungen weniger zu trauen als dem eigenen Augenschein und dem ausgeworfenen Lot, glichen dies mehr als aus.

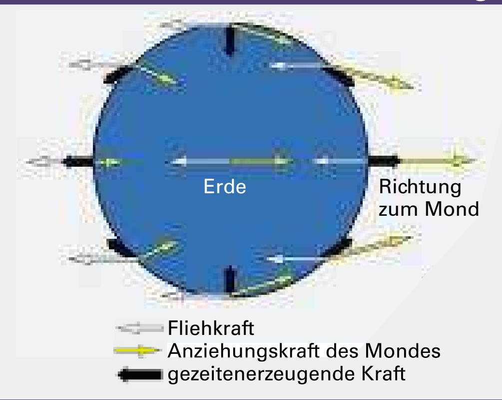
Derartige Ansätze führten die Wissenschaft an Land freilich kaum weiter. Hier sorgte insbesondere das neue, durch Newton gewonnene Verständnis von Erde und Mond als im Gleichgewicht von Anziehungs- und Fliehkräften rotierendes Zwei-Körper-System für eine tragfähige Grundlage, auf der Astronomen und Mathematiker aufbauen konnten: Erde und Mond umkreisen einen gemeinsamen Schwerpunkt, der zwar innerhalb des Erdkörpers liegt, aber nicht mit dessen Schwerpunkt identisch ist. Aus der Anziehungskraft unseres Trabanten und aus der auf die Erde wirkenden Fliehkraft der gemeinsamen Bewegung resultieren Schwerkraftstörungen, die auf der mondzu- und der mondabgewandten Seite der Erdoberfläche die globalen Wassermassen aufstauen und sie in den Gebieten dazwischen absenken (siehe Kasten auf der nächsten Seite).

Preis für eine nicht lösbare Aufgabe

Wäre unser Planet vollständig von einem tiefen Ozean umhüllt, dann umkreisten diese beiden »Gezeitenberge« – die mondzugewandte Zenitflut und die mondabgewandte Nadirflut – die Erdkugel mit dem monatlichen Umlauf unseres Trabanten. Da sich die Erde jedoch zusätzlich selbst täglich einmal um die eigene Achse dreht, läuft die Erdoberfläche im Laufe eines Tages unter beiden Gezeitenbergen hindurch. Soweit scheint die grundsätzliche Erklärung des Phänomens einfach. Der Mond umkreist die Erde jedoch nicht über ihrem Äquator, sondern geneigt dazu; zudem ist seine Bahn nicht kreis-, sondern ellipsenförmig. Auch sind die Einflüsse der Sonne zu berücksichtigen, die das Phänomen teils verstärken, teils abschwächen. Tatsächlich ist deshalb die Berechnung der gezeitenerzeugenden Kräfte ausgesprochen komplex.

Im Jahr 1738 stellte die Pariser Académie des Sciences die – nach heutiger Kenntnis nicht lösbare – Preisaufgabe, ▷

Wie die Gezeitenberge und -täler entstehen



Das Zusammenspiel mehrerer Kräfte sorgt für die Gezeiten auf der Erde. Die Anziehungskraft des Mondes wirkt stets in Richtung seines Schwerpunkts und ist abhängig von seiner Entfernung zum jeweiligen Wirkort an der Erdoberfläche (gelbe Pfeile). Die Fliehkraft der gemeinsamen Bewegung, deren Mittelpunkt nicht im Schwerpunkt der Erde liegt, sondern um etwa $^3/_4$ des Erdradius in Richtung Mond verschoben ist, wirkt hingegen an allen Orten der Erdoberfläche mit gleicher Kraft parallel zu dieser Verbindungsachse Erde-Mond (weiße Pfeile).

Die resultierende Kraft zeigt bereits die Form der Gezeitenberge und -täler (schwarze Pfeile). Der Betrag der vertikal wirksamen Kräfte ist mit 1,1 Gramm je Tonne gering, derjenige der horizontalen mit 0,8 Gramm je Tonne noch geringer. Die horizontalen Kräfte sind allerdings erheblich wirksamer, da ihnen keine der Schwerkraft vergleichbaren Kräfte entgegenstehen.

DEUTSCHES SCHIFFAHRTSMUSEUM BREMERHAVEN

▷ ein wissenschaftliches Verfahren für die globale Vorhersage der Gezeiten zu entwickeln. Drei der vier prämierten Arbeiten, eingereicht von den Schweizern Daniel Bernoulli (1700–1782) und Leonhard Euler (1707–1783) sowie dem Schotten Colin MacLaurin (1698–1746), fußten auf Newtons neuer Gravitationstheorie. Doch so korrekt diese Ansätze auch waren, so schwierig erwies sich die Umsetzung in die Praxis. Denn die dargestellten gezeitenerzeugenden Kräfte und Gezeitenbewegungen setzten stets die Vorstellung eines erdumspannenden, ausreichend tiefen Ozeans voraus. Die geografische Wirklichkeit ist jedoch bekanntlich anders: Landmassen begrenzen die Meere, und der Ozeanboden beeinflusst den Verlauf der Gezeiten. Zusätzlich erzeugt die Erddrehung wegen der Trägheit der Wassermassen die so genannte Corioliskraft, die großräumige Wasserströmungen nach Westen hin ablenkt. Von einer hinreichenden Gezeitenprognose für die Seeschifffahrt war man deshalb noch weit entfernt.

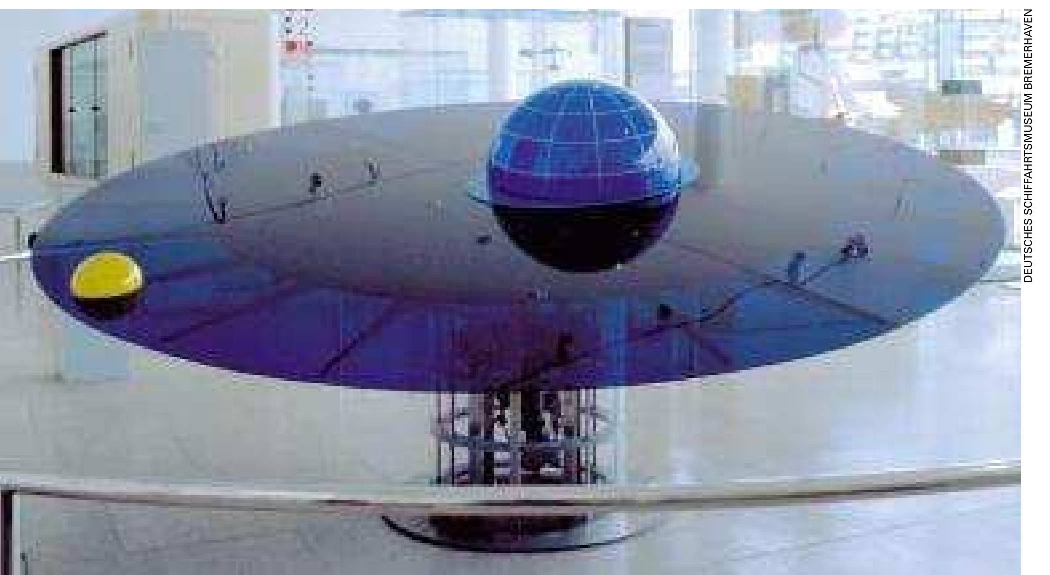
Das fiel freilich auch den interessierten Zeitgenossen Newtons oder Eulers auf. Und so verstärkte man die schon in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts vielerorts in England und Frankreich begonnenen systematischen Beobachtungen der lokalen Gezeitenverhältnisse. Zum Beispiel erschien kaum ein Jahrgang der renommierten »Transactions of the Royal Society of London«, ohne neue Beobachtungen in Bezug auf die Gezeiten zu enthalten.

Gezeiten als Schwingungssysteme

Doch es war wieder ein Franzose, der den Grundstein für die weitere Entwicklung legte: Pierre Simon de Laplace (1749–1827) fasste als Erster die Gezeiten nicht mehr als statisches Problem von Druckunterschieden auf, sondern als dynamisches von erzwungenen Wellen. Er leitete damit eine Phase der Gezeitenforschung ein, in der man erst ihre volle Komplexität erkannte. Das Meer und die geomorphologischen Gegebenheiten rückten noch mehr in den Vordergrund. Im Interesse immer größerer Messpräzision entwickelten Tüftler und Ingenieure selbstregistrierende Pegel für den Wasserstand und Messgeräte für den Gezeitenstrom, also für die vertikale und horizontale Komponente der Gezeiten.

Auch von Großbritannien gingen neue Impulse aus, als der Wissenschaftsphilosoph William Whewell (1794–1866) darstellte, dass die Gezeiten nicht als erdumlaufende Wellen im Sinne der Newton'schen Vorstellung zu verstehen sind, sondern kreisläufige, so genannte amphidromische Schwingungssysteme darstellen, die sich durch das seit Jahrmillionen andauernde geophysikalische Kräftespiel auf den Weltmeeren ausgeprägt haben. Selbst die Nordsee enthält drei solcher amphidromischen Systeme (siehe Grafik auf S. 56).

Doch nicht nur die – wegen der komplizierten Mondbahn und der Sonneneinflüsse über viele Jahre erforderliche – Beobachtung und Analyse der Formen lokaler Gezeitenerscheinungen beschäftigte die Wissenschaftler. Auch die Möglichkeiten einer mathematischen Vorausberechnung wollten ergründet sein. Denn die gemessenen Tidenkurven entsprachen kaum je einer regelmäßigen Sinuskurve, sondern wiesen unregelmäßige Formen auf, was eine Vorausberechnung erheblich behinderte. John William Lubbock (1803–1865) veröffentlichte im Jahr 1833 Tabellen, in denen er verschiedene Monddaten – Durchgangszeit durch den Meridian von Greenwich, Deklination (Abweichung vom Himmelsäquator) und Parallaxe (unterschiedliche Entfernung von der Erde) – mit den beobachteten Hochwasserzeiten an



DEUTSCHES SCHIFFAHRTSMUSEUM BREMERHAVEN

◀ Das Erde-Mond-Modell im Deutschen Schiffahrtsmuseum verdeutlicht, dass der Schwerpunkt der gemeinsamen Bewegung nicht mit dem Schwerpunkt der Erde identisch, sondern in Richtung Mond versetzt ist.

der London Bridge in Zusammenhang brachte. Die nach diesem – als non-harmonisch bezeichneten – Verfahren gewonnenen Gezeitenvorausberechnungen waren besser als alle vorangegangenen und bildeten einen Meilenstein, der jedoch erst später insbesondere für Seichtwasserreviere in seiner vollen Tragweite erkannt wurde.

Mammutrechner für die Vorhersage

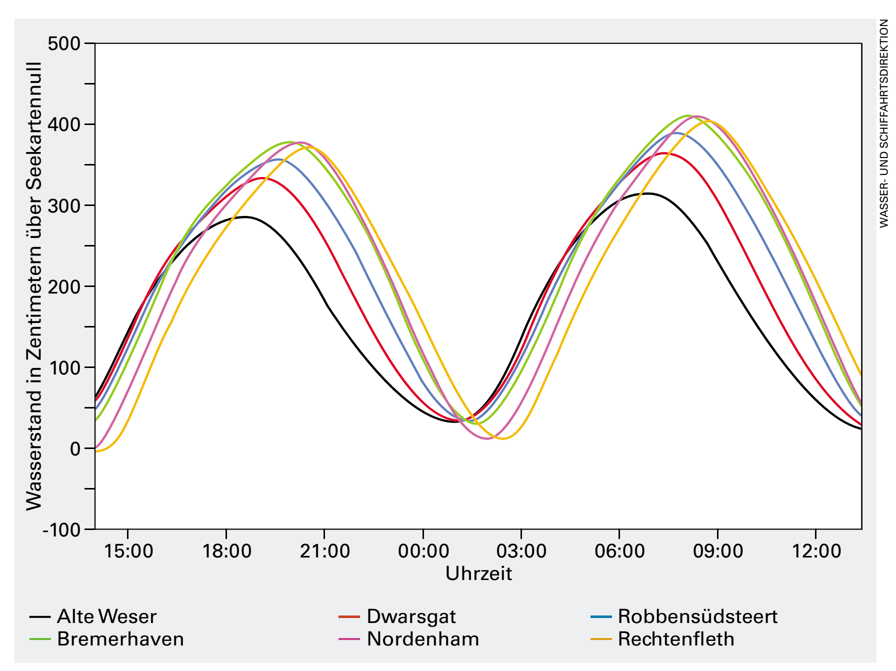
Denn zunächst machte ein anderes Verfahren Furore. Der Engländer William Thomson (1824–1907), besser bekannt unter seinem Adelsnamen Lord Kelvin, wandte die von dem französischen Mathematiker Jean Baptiste Joseph Fourier (1768–1830) entwickelte harmonische Analyse auf die Gezeiten an, was das maschinelle Berechnen von Gezeitendaten ermöglichte. Hierbei wird eine unregelmäßige Kurve durch mathematische Analyse in eine Vielzahl harmonischer Teilschwingungen zerlegt, die durch ihre Regelmäßigkeit verhältnismäßig leicht vorauszuberechnen sind. Anschließend werden die Teilschwingungen durch Umkehrung des Verfahrens, die Fourier-Synthese, so gut als möglich zur ursprünglichen unregelmäßigen Kurve wieder zusammengesetzt. Kelvin entwarf hierfür 1872/73 die erste Analog-Gezeitenrechenmaschine, die in ihrer grundsätzlichen Konstruktion zum Vorbild aller späteren Maschinen dieser Art wurde. Sie enthielt zehn Tidengetriebe, was sich jedoch in der Folgezeit als nicht ausreichend erwies, sodass die kurz darauf gebaute zweite Maschine auf 24 Tidengetriebe erweitert wurde.

HERBERT, DU KANNST MICH JETZT WIEDER AUSBUDDELN, DIE FLUT KOMMT!
HERBERT! HERBERT?

Das kaiserliche Deutschland interessierte sich ebenfalls für derartige Maschinen – hauptsächlich aus militärischen Gründen, und um unabhängig zu sein von den hydrografischen Daten der britischen Admiralität. Die 1915/16 in Potsdam-Babelsberg gebaute erste deutsche Gezeitenrechenmaschine arbeitete nach dem Kelvin'schen Prinzip und zerlegte die Tidenkurve des jeweiligen Hafens in 20 Teiltiden (siehe Foto S. 57). Die zweite deutsche Maschine, 1939 gebaut, verfügte sogar über 62 Teiltiden und war mit sieben Tonnen Gewicht und sieben Meter Länge der größte jemals gebaute Apparat dieser Art. Sie tat ihren Dienst immerhin bis 1968, als elektronische Lochstreifenrechner sie ablösten. Wenige Jahre zuvor, 1955, hatte auch die DDR eine Version dieser Maschine mit 34 Teiltiden gebaut, um in den Zeiten des Kalten Krieges für den militärischen Ernstfall gerüstet zu sein.

Der Bau derartiger Maschinen wie überhaupt die fachwissenschaftliche Entwicklung der Gezeitenkunde fand bisher weit gehend unbeachtet von der Öffentlichkeit statt. Seit kurzem nun hat sich das Deutsche Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven dem Thema zugewandt. In einer eigenen und in dieser Konzeption einzigartigen Ausstellungsabteilung wird zunächst mit Hilfe von interaktiven Funktionsmodellen das Phänomen der Gezeiten grundsätzlich erklärt. Die häufig gestellten Fragen, warum denn nicht jeden Tag zur gleichen Uhrzeit Hochwasser sei oder warum der Vollmond die Wassermassen mehr anziehe als der Halbmond, werden hier beantwortet.

Zwei weitere Ausstellungseinheiten präsentieren die geschichtliche Entwicklung von Pegeln und Strommessgeräten sowie die teils tonnenschweren, teils bordtauglichen Analogrechenmaschinen zur Vorausberechnung der Tiden. Auch hier helfen mechanische Modelle und elektronische Medien, die Funktionsweise der einzelnen Gerätschaften zu verstehen. Das Museum erfüllt damit nicht nur seinen Sammlungsauftrag, sondern fungiert auch – als Forschungsinstitut der Leibniz-Gemeinschaft – als Vermittler im Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft. ◁



▼ **Messungen an der Außen- und Unterweser verdeutlichen den Tidengang innerhalb eines Tages: Die Gezeitenwelle erreicht die einzelnen Pegelorte zu unterschiedlichen Zeiten und verstärkt sich beim Hereinlaufen in den Fluss. Zugleich wird die Kurve zunehmend unregelmäßig: Der Tidenstieg verkürzt sich zu Gunsten des Tidenfalls.**



Albrecht Sauer ist promovierter Technikhistoriker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven.

AUTOR

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Märkte im Labor

Wirtschaftswissenschaftler überprüfen ihre Theorien immer häufiger im Experiment. Hauptergebnis dieses neuen Ansatzes: Die Märkte, auf denen Güter gehandelt werden, folgen erkennbaren Regeln – nur für die Finanzmärkte gilt das nicht.

Von Bernard Ruffieux

»Wäre es möglich, in den Wirtschaftswissenschaften kontrollierte Experimente durchzuführen, könnte man auf diesem Weg Gesetze oder Theoreme aufstellen. Leider lassen sich in der Ökonomie die zahlreichen relevanten Faktoren nicht so beherrschen wie in der Chemie oder Biologie. Wirtschaftsforscher müssen sich also genau wie Astrophysiker oder Meteorologen mit reinen Beobachtungen begnügen.«

So schrieb Paul Samuelson, der 1970 den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften erhielt, in einem 1985 veröffentlichten Standardwerk. Doch seine Weisheit veraltete schnell. Siebzehn Jahre später, im Jahr 2002, ging derselbe Preis an Vernon Smith von der George-Mason-Universität in Arlington (Virginia) und Daniel Kahneman von der Universität Princeton (New Jersey), und zwar genau für solche experimentellen Arbeiten, die Samuelson für unmöglich erklärt hatte (Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 22).

Seitdem fühlen sich die Ökonomen veranlasst, Theorien zu bilden, die das Verhalten des Menschen vorhersagen, und zwar des alltäglichen *Homo sapiens* und nicht nur des Kunstwesens *Homo oeconomicus*, den sie eigens für ihre theoretischen Modelle geschaffen haben. Heute pflegt man in der Wirtschaftsforschung genau wie in den klassischen experimentellen Wissenschaften jedes Modell so weit wie möglich durch Versuche zu überprüfen. Der neue Ansatz wirkt bis in die Theoriebildung hinein, denn die Forderung, jedes neue Modell im Labor zu überprüfen, setzt sich mehr und mehr durch. Was ist dabei herausgekommen?

Vor allem eine Reihe überraschender Erkenntnisse über die »Effizienz« von Märkten. Dieser Begriff beschreibt, ähnlich dem Wirkungsgrad in der Technik, in welchem Ausmaß ein Markt eine potenziell erzielbare Wertschöpfung realisiert. Alle bisherigen Ergebnisse zeigen, dass zwischen der Effizienz von Gütermärkten und Finanzmärkten ein krasser Unterschied besteht.

In modernen Volkswirtschaften sind Märkte allgegenwärtig: Arbeitsmärkte, Märkte für den Handel unter Unternehmen, Märkte für Endverbraucher, Kapitalmärkte und Geldmärkte, um nur einige zu nennen. Ihre Bedeutung wächst gegenwärtig dadurch, dass bislang regulierte Sektoren der Wirtschaft dem Wettbewerb geöffnet werden und dass im Rahmen der Globalisierung Waren ebenso wie Kapital zunehmend über Landesgrenzen hinweg bewegt werden.

Bei aller Verschiedenheit im Einzelnen haben Märkte gemeinsame Funktionen, die sich zu zwei großen Gruppen zusammenfassen lassen. Zum einen koordinieren sie Entscheidungen: Allein durch die Handelsaktivitäten schaffen sie Transparenz in komplexen modernen Gesellschaften, wo jedem Menschen nur ein winziger Teil der globalen Information zugänglich ist. Zum anderen schaffen sie Wettbewerb – die Voraussetzung dafür, dass die durch Eigeninteresse angetriebenen Wirtschaftssubjekte im Sinne des Gemeinwohls handeln. So soll beispielsweise der Arbeitsmarkt sicherstellen, dass die verfügbaren Fähigkeiten auf die bestmögliche Weise den zu erledigenden Aufgaben zugeordnet werden. Zugleich soll er die Lohnempfänger zu guten Leistungen motivieren.

Man fülle eine hinreichende Anzahl Wirtschaftssubjekte in einen geschlossenen Raum, gebe ein Regelwerk (die »Institutionen«) sowie eine Grundausstattung an Kaufkraft hinzu und lasse die Mischung über mehrere Handelsphasen reagieren. Das Ergebnis verblüfft: In der Simulation eines Aktienmarkts regiert die Unvernunft, und kein Regelwerk kann das verhindern.

Die Funktion des Kapitalmarktes besteht darin, das verfügbare Kapital – unter Berücksichtigung der Risiken – den rentabelsten Vorhaben zuzuleiten und die Unternehmenslenker zu weisen Entscheidungen zu veranlassen. So genannte Business-to-Business-Märkte sollen den Einsatz von Rohstoffen und Halbfertigwaren optimieren, indem sie den Lieferanten einen Anreiz bieten, qualitativ hochwertige Produkte zum gewünschten Termin und zum günstigsten Preis zur Verfügung zu stellen. Ohne die Fähigkeit der Märkte, ihre Teilnehmer zu koordinieren und zu motivieren, würden die westlichen Volkswirtschaften nicht funktionieren.

Gewiss unterliegen Märkte heute zahlreichen Regeln und Schutzvorschriften wie Kartellrecht, Arbeitsrecht und Vorschriften zu Normung, Produktzertifizierung und Rechnungslegung. Dreh- und Angelpunkt freier Wirtschaftssysteme bleibt jedoch der ungehinderte Austausch von Gütern, denn der Wettbewerb garantiert, dass persönliche Leistungsfähigkeit in volkswirtschaftliche Gesamtleistung umgesetzt wird.

Herkömmliche Theorien zu den verschiedenen Markttypen verkünden zunächst eine frohe Botschaft: Indem jeder Teilnehmer seine eigenen Interessen verfolgt, dient er, ohne es überhaupt zu merken, in bestmöglicher Weise der gesamten Gesellschaft. Jeder überhaupt denkbare volkswirtschaftliche Nutzen kann durch einen Markt mit Wettbewerb realisiert werden. Darüber hinaus kommt dieser Mechanismus mit wenig Information aus. Es genügt, wenn jeder Beteiligte seine eigenen Präferenzen kennt, also der Käufer den maximalen Betrag, den er für die Güter des Marktes zu zahlen bereit ist, und der Verkäufer seine Selbstkosten und damit den Betrag, unterhalb dessen er seine Güter nicht verkaufen oder gar nicht erst produzieren würde. Dann kann jeder allein auf Grundlage des Preises, den der Markt ihm ansagt, die für ihn besten Entscheidungen treffen. Die »unsichtbare Hand« des Marktes, wie Adam Smith (1723–1790), der »Vater der Ökonomie«, es nannte, erledigt den Rest.

Die unsichtbare Hand in Fesseln

Die Standardtheorie hält jedoch auch schlechte Nachrichten bereit. So müssen gewisse Bedingungen erfüllt sein, damit ein freier Markt reibungslos funktionieren kann. Unter anderem darf es keine Monopole und keinen Protektionismus geben, beispielsweise von Seiten großer Konzerne oder mächtiger Gewerkschaften, die den Preis einer Ware oder der Arbeit dem Gesetz von Angebot und Nachfrage entziehen können.

Seit einem Jahrhundert versucht man, alle notwendigen Voraussetzungen für das Funktionieren eines Marktes zusammenzutragen, aber die Liste nimmt kein Ende. In der Realität sind niemals alle Bedingungen gleichzeitig erfüllt, und einige sind miteinander unvereinbar. In letzterem Fall ist ein Kompromiss nötig, und man weiß noch kaum, wie dieser sich auf die Effizienz der betreffenden Märkte auswirkt.

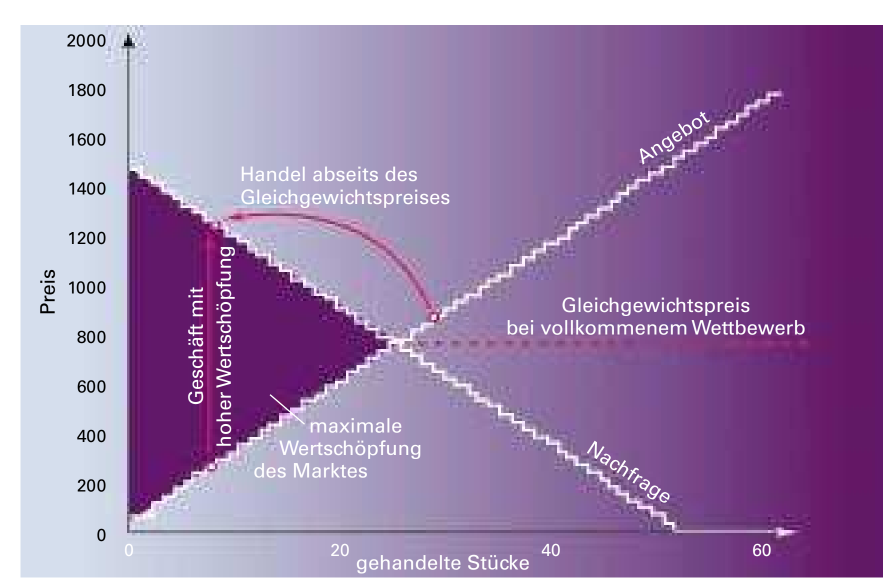
Die zweite schlechte Nachricht: Selbst wenn man weiß, dass in einem Markt ein Gleichgewichtszustand existiert, bleibt unbekannt, über welchen Mechanismus er zu Stande kommt. Insbesondere ist unklar, ob und wie eine aus der Balance geratene Volkswirtschaft zum Gleichgewicht zurückkehren kann. Nun verändern sich ständig Produkte, Präferenzen der Konsumenten und Kosten der Unternehmen, und man erwar- ▷

tet von einem Markt in unserem Wirtschaftssystem vor allem, dass der Anpassungsvorgang von einem Gleichgewicht zum nächsten effizient verläuft.

Drittens haben die meisten realen Märkte nur wenig mit denen der Theorie gemein, und man ist weit davon entfernt, alle Abweichungen zu kennen. Viertens schließlich muss jedes theoretische Modell, aus dem Vorhersagen ableitbar sein sollen, Hypothesen zum Verhalten des Einzelnen umfassen. Aber das rational, egoistisch und opportunistisch handelnde Individuum, von dem die Theorie in der Regel ausgeht, kommt in der Wirklichkeit kaum vor.

Bleiben die Voraussagen der Theorie zum Gesamtverhalten eines Marktes auch dann richtig, wenn die genannten Annahmen zum menschlichen Verhalten nicht zutreffen? Genau um diese Frage geht es den »Laborökonomen«. Sie entwerfen Modellmärkte, die sie einfach kontrollieren und beobachten können und mit denen sich Versuche beliebig wiederholen lassen. Um eine bestimmte Theorie zu testen, schaffen sie einen Markt, der dem der Theorie möglichst ähnlich ist. Anstatt ihn jedoch mit Exemplaren des realitätsfernen *Homo oeconomicus* zu bevölkern, bitten sie Menschen aus Fleisch und Blut in ihre Labors. Diese werden den durch die Theorie beschriebenen Bedingungen ausgesetzt und dann ihr Einzel- und Gruppenverhalten beobachtet.

Die Angebotskurve ergibt sich, wenn man die Angebote der Verkäufer nach aufsteigenden Selbstkostenpreisen sortiert. Die Nachfragekurve besteht dementsprechend aus den für die Käufer maximal akzeptablen Preisen, beginnend mit den höchsten Werten. Die maximal mögliche Wertschöpfung entspricht der dunklen Dreiecksfläche links vom Schnittpunkt der zwei Kurven. Dieser bestimmt den Gleichgewichtspreis (gestrichelte Linie).



Wertschöpfung beim Tauschgeschäft

Wie ist nun die »Effizienz« eines Marktes zahlenmäßig zu bestimmen? Nehmen wir zunächst den einfachsten denkbaren Markt: Es gibt nur einen Käufer und einen Verkäufer, zum Beispiel zwei Studierende (Bild rechts). Der eine kommt ins zweite Semester und braucht sein bisheriges Lehrbuch nicht mehr. Der andere beginnt gerade mit seinem Studium und will genau dieses Werk kaufen. Nehmen wir weiter an, dass der Verkäufer für seinen Besitz mindestens zwei Euro haben will und das Buch dem Käufer zehn Euro wert ist. Wenn das Buch beispielsweise für sieben Euro den Besitzer wechselt, kann sich der Käufer um drei Euro reicher schätzen und der Verkäufer um fünf. Der Handel schafft also einen Vorteil von insgesamt acht Euro, der als die »Wertschöpfung« oder »ökonomische Rente« des Tauschgeschäfts bezeichnet wird.

Für die Wertschöpfung spielt der Preis keine Rolle, solange er sich in dem gegebenen Rahmen hält – hier von zwei bis zehn Euro. Er bestimmt nur, wie sich der geschaffene Wert auf beide Parteien aufteilt. Wenn die Transaktion erfolgt, sagt man, der Markt sei effizient. Andernfalls ist die Effizienz null.

Bei einer größeren Zahl von Käufern und Verkäufern wird die Situation komplizierter. Nehmen wir an, auf dem Markt treffen sich Verkäufer, die jeder genau ein Stück von einer bestimmten Ware anzubieten haben, sagen wir Äpfel, und Käufer, die jeder genau ein Stück dieser Ware haben wollen. Alle Äpfel sind gleich. Wenn sämtliche individuellen Präferenzen – sprich für jeden Käufer der maximale und für jeden Verkäufer der minimale akzeptable Preis – gegeben sind, dann lässt sich eine maximal mögliche Wertschöpfung errechnen. Sie kommt – zum Beispiel – dann zu Stande, wenn der zahlungsfreudigste Käufer mit dem billigsten Verkäufer handelseinig wird, die beiden daraufhin vom Markt verschwinden, auf dem so reduzierten Markt wieder der Zahlungsfreudigste seinen Apfel beim Billigsten kauft und so weiter, bis wegen unvereinbarer Preisvorstellungen kein Geschäft mehr zu Stande kommt.

In der Praxis wird die theoretisch mögliche Wertschöpfung meistens nicht erreicht. Ich finde auf einem Flohmarkt einen Gegenstand, dessen Preis meinen Vorstellungen entspricht, und kaufe ihn, ohne zu merken, dass ein anderer Verkäufer denselben Artikel mit einem niedrigeren Minimalpreis anbietet. Der bleibt auf seiner Ware sitzen; wenn ich bei ihm gekauft hätte, wäre die Gesamtwertschöpfung größer gewesen.

Die Effizienz eines Marktes ist definiert als das Verhältnis aus der realisierten und der maximal möglichen Wertschöpfung. Je höher dieser Quotient ausfällt, desto »wertschöpfungseffizienter« ist ein Handelsplatz. Man kann ferner nachweisen, dass ein Markt dann wertschöpfungseffizient ist, wenn er preiseffizient ist, das heißt, wenn die Transaktionen ungefähr zum »Gleichgewichtspreis bei vollkommenem Wettbewerb« abgewickelt werden.

Was hat man unter diesem Gleichgewichtspreis zu verstehen? Angenommen, man kennt den Selbstkostenpreis jedes Anbieters und den maximalen Preis jedes Interessenten. Dann kann man die entsprechenden Angebote jeweils von günstig nach ungünstig sortieren, also von billig nach teuer für die Verkaufsangebote und von hoch nach niedrig für die Kaufofferten. Auf diese Weise erhält man die (steigende) Angebotskurve und die (fallende) Nachfragekurve. Der Schnittpunkt der beiden Kurven legt den Gleichgewichtspreis fest (Bild links).



Ein Handel macht beide Partner glücklich, denn der Verkäufer hat für das Anfängerlehrbuch keine Verwendung mehr und misst ihm daher wenig Wert bei, während der Käufer es dringend benötigt. Die Differenz der beiden Bewertungen – hier 8 Euro – ist die potenzielle Wertschöpfung; sie wird realisiert, wenn das Geschäft stattfindet. Von den 8 Euro gehen 5 an den Verkäufer und 3 an den Käufer.

Wenn dieser Preis von Anfang an bekannt und vorgeschrieben ist und jeder ausschließlich nach seinem eigenen Vorteil strebt, dann finden alle Transaktionen statt, die zur Gesamteffizienz des Marktes beitragen, und nur diese. Aber das Schöne ist: Der Preis muss gar nicht angesagt werden! In der Realität kennt jeder von allen Preisvorstellungen nur seine eigene, und trotzdem setzt sich der Gleichgewichtspreis durch: Wegen des Wettbewerbs kommen zu teure Anbieter oder zu geizige Kaufinteressenten nicht zum Zug. Die Verkäufer müssen also ihre Forderungen mäßigen, während die Angebote der Käufer in die Höhe klettern. Vorausgesetzt, niemand akzeptiert Mondpreise oder verkauft unter Wert, treffen sich die Preisvorstellungen auf einem bestimmten Niveau. Das ist der Gleichgewichtspreis: eine öffentliche Information, die durch den Marktprozess bereitgestellt wird und ihrerseits auf privaten Informationen beruht, das heißt solchen, die jeder Marktteilnehmer geheim halten will.

So zumindest sieht die klassische Theorie aus: Ein Gütermarkt konvergiert durch den Wettbewerb gegen den Gleichgewichtspreis. Er ist also preiseffizient und, da jeder Teilnehmer allein seinem eigenen Interesse folgt, auch wertschöpfungseffizient in dem Sinne, dass mit keinem anderen Verlauf des Handels eine höhere Gesamtwertschöpfung zu Stande gekommen wäre. Es kann zwar ein einzelner Marktteilnehmer – zum Beispiel durch geschicktes Verhandeln – ein für ihn günstigeres Geschäft machen, aber nur auf Kosten eines anderen. Wenn die Regeln des Marktes keinen einheitlichen Preis verlangen – wie in den meisten echten Märkten und in allen Experimenten, die wir beschreiben werden –, dann ist Preiseffizienz eine hinreichende, aber nicht notwendige Bedingung für Wertschöpfungseffizienz. Aus diesem Grund werden wir weiterhin beide Kriterien verwenden.

Marktmodelle auf dem Prüfstand

Ein wirtschaftswissenschaftliches Experiment ist so etwas wie ein Spiel mit mehreren Personen, dessen Regeln die Hypothesen des zu untersuchenden Marktmodells wiedergeben. In den Fällen, die uns interessieren, gehören diese Annahmen in drei Kategorien: Umwelt, Institutionen des Marktes und Verhalten der Marktteilnehmer. Mit »Umwelt« ist die Struktur der Volkswirtschaft gemeint, in der ein Markt angesiedelt ist, insbesondere die Anzahl der Wirtschaftssubjekte, aber auch die Ressourcenausstattung und die Produktionsmethoden der Anbieter, denn diese bestimmen den Wert, den die Hersteller ihren Gütern beimessen. Ein drittes Merkmal der Umwelt ist der Nutzen, den jeder Käufer den Produkten beimisst, mit anderen Worten: der maximale Preis, den er dafür zu zahlen bereit ist. Aus diesen Daten lassen sich – siehe oben – bereits die Bedingungen für Preis- und Wertschöpfungseffizienz ableiten, insbesondere der Gleichgewichtspreis; es ist aber noch nichts darüber gesagt, wie der Markt dieses Gleichgewicht erreicht.

Die »Institutionen« legen fest, wie die Marktteilnehmer interagieren. Hierher gehören die Vorschriften für die Kommunikation und die Abwicklung des Handels, die in der Realität von Markt zu Markt häufig sehr unterschiedlich sind. So sind die Verbraucher westlicher Länder gewöhnt, dass die Produkte eine Preisauszeichnung tragen. In anderen Wirtschaftsräumen pflegt man jeden Preis einzeln auszuhandeln. Im Experiment arbeitet man meistens mit einem von zwei – der Realität abgeschauten – Markttypen. Einer ist der so genannte Posted-Offer-Markt, ein Markt mit veröffentlichten, nicht verhandelbaren Verkaufsangeboten wie im Supermarkt. Der Kunde kann die jeweilige Produkt-Preis-Kombination nur annehmen oder ablehnen – eine Entscheidungssituation, die Wirtschaftsforscher als Ultimatum bezeichnen und die jedem vom Wochenendeinkauf geläufig ist.

Der andere Markttyp ist die »Doppelauktion« (*double oral auction* oder eben der »Apfelmarkt«). Hier dürfen die Kaufinteressenten mitreden: Sie können jederzeit ein Kaufangebot unterbreiten, indem sie einen Preis und eine maximale Abnahmemenge nennen. Das aktuell beste Angebot – also dasjenige mit dem höchsten Preis – wird an alle anderen Versuchsteilnehmer weitergeleitet und erscheint zeitgleich auf ihren Computerbildschirmen. Die Verkäufer können dieses Angebot wahrnehmen und zu dem entsprechenden Preis die gesamte oder einen Teil der nachgefragten Menge verkaufen. Ebenso kann zu jeder Zeit ein anderer, konkurrierender Käufer den aktuellen Nachfragepreis überbieten. Dann ersetzt sein Kaufgesuch das vorhergehende. Man bezeichnet diese Organisationsform des Marktes deshalb als Doppelauktion, weil parallel zu den Käufern auch die Verkäufer Angebote abgeben dürfen.

Auch diese können durch die Gegenseite angenommen oder aber von einem konkurrierenden Verkäufer durch ein vorteilhafteres Gebot ersetzt werden, in diesem Fall mit niedrigerem Verkaufspreis. Der Wettbewerb führt dazu, dass die geforderten Preise in dieser Hälfte der Auktion sinken. Dagegen lässt die Konkurrenz unter den Käufern deren Angebotspreise nach oben klettern. Wird auf beiden Seiten eifrig geboten, streben die zwei Auktionen schließlich auf denselben Preis zu. Die Doppelauktion ist ▷

eine vereinfachte Version des Verfahrens, nach dem die meisten Wertpapier- und Rohstoffbörsen funktionieren.

Der dritte Einflussfaktor, der die Eigenschaften eines Marktes bestimmt, ist das Verhalten der einzelnen Teilnehmer. Der Wert, den sie den gehandelten Gütern beimessen, und die Institution des Marktes sind vorgegeben; was werden sie tun? Die klassische theoretische Antwort auf diese Frage ist ein Kunstwesen namens *Homo oeconomicus*. Im einfachsten Fall handelt es sich um ein vollkommen rational handelndes, gegenüber anderen Menschen gleichgültiges Geschöpf, das darauf aus ist, seinen Nutzen zu optimieren und nichts sonst. Der echte *Homo sapiens* ist da anders: Er ist nur begrenzt rational, gibt sich oft mit einem Gewinn zufrieden, den er für »ausreichend« hält, und kümmert sich in gewissem Grad auch um andere. Insbesondere legt er Wert auf Fairness (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52).

Jede Markttheorie gründet sich auf eine präzise und vollständige Beschreibung der Umwelt, der Institution und des menschlichen Verhaltens. Eine solche Theorie sagt das Gesamtverhalten des Marktes voraus, insbesondere in den beschriebenen Fällen seine Preis- und Wertschöpfungseffizienz. Ein Experiment soll Umwelt und Institutionen möglichst genau der Theorie nachbilden; nur der *Homo oeconomicus* mit seinem hypothetischen Verhalten wird durch echte Menschen ersetzt. Man beobachtet dann, ob die Voraussagen der Theorie immer noch zutreffen. Falls nicht, dann setzt das aus den Naturwissenschaften geläufige Wechselspiel ein: Auf Grund der Abweichungen zwischen Theorie und Realität modifizieren die Ökonomen die Theorie, überprüfen sie mit dem Experiment, und so weiter.

Der Versuchsleiter schreibt den Appetit auf die Äpfel vor

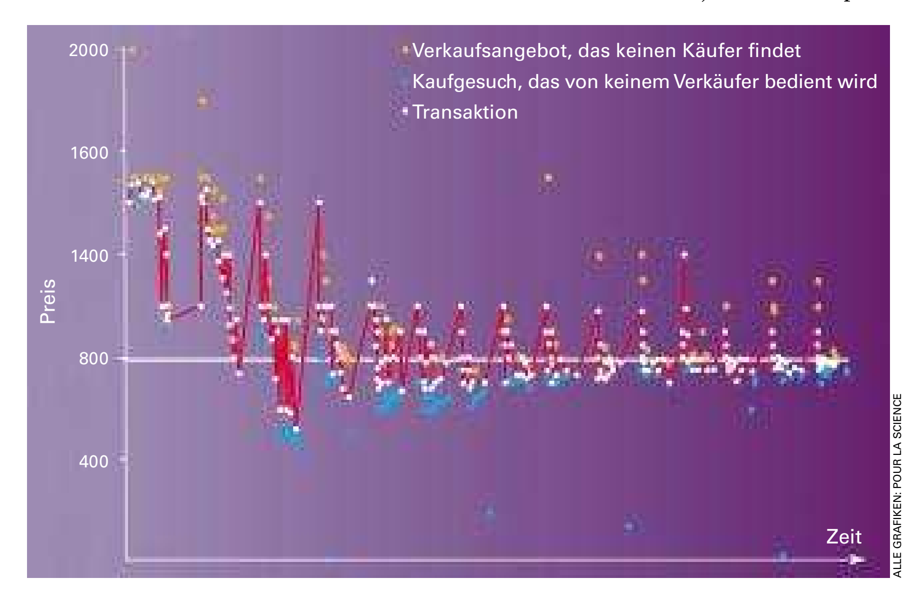
Wie bildet man im Experiment die Eigenschaften eines Marktes nach? Mit der Institution ist das relativ einfach: Durch Einsatz miteinander vernetzter Computer kann man die Spielregeln bestimmen und den Austausch von Informationen und Waren genau kontrollieren.

Die Umwelt wirft schon größere Schwierigkeiten auf. Man muss eine Situation schaffen, in der die Anbieter und Nachfrager den zu handelnden Gütern einen Wert beimessen; das ist noch nicht schwer. Aber der Versuchleiter muss diesen Wert kennen und beeinflussen können. Wenn es bei den Transaktionen beispielsweise um Essbares geht: Woher soll er wissen, wie viel einem teilnehmenden Studenten ein Keks wert ist? Das müsste er aber wissen, um die Wertschöpfung und auf diesem Weg die Effizienz des Marktes berechnen zu können.

Man löst dieses Problem mit einem Verfahren von Vernon Smith, der »Methode des induzierten Wertes« (*induced value*). Man führt ein fiktives Gut ein, das beispielsweise durch identische Spielmarken dargestellt wird. Nach Marktschluss können die Käufer die erworbenen Marken gegen Geld einlösen, und die Verkäufer müssen nachträglich für die von ihnen veräußerten Exemplare bezahlen. Jeder Teilnehmer wird vorab informiert, wie viel er für eine Marke bekommt beziehungsweise bezahlen muss. Diese Werte sind für jeden Teilnehmer verschieden und von diesen geheim zu halten. Außerdem bringt beziehungsweise kostet die zweite Marke einen anderen Betrag als die erste, die dritte wieder einen anderen und so weiter. Auf diese Weise können die Forscher eine Angebots- und eine Nachfragekurve und damit die maximal erreichbare Wertschöpfung nach Belieben festlegen. Sie können beobachten, ob die Teilnehmer wirklich nur rational, das heißt auf ihren eigenen Vorteil bedacht, handeln und am Ende die Gesamteffizienz des Marktes errechnen.

Wichtig: Ein wirtschaftswissenschaftliches Experiment ist kein reines Spiel. Es geht um echtes Geld. Liegt beispielsweise der Rücknahmewert einer Marke für den Käufer bei 15 Euro und hat er sie im Experiment für 12,50 Euro gekauft, dann bekommt er hinterher seinen Gewinn von 2,50 Euro ausgezahlt. Der Ablauf der Experimente wird bis ins Detail festgelegt, sodass sie jederzeit reproduzierbar sind. Die Versuche finden meist am Computer statt, wobei die Teilnehmer so voneinander abgeschottet sind, dass sie nur auf genau festgelegte Weise kommunizieren oder die Handlungen der anderen beobachten können. Zu Beginn jedes Versuchs trainieren die Probanden zunächst den Umgang mit der jeweiligen Institution. Dann werden sie durch den Versuchsleiter über die Umwelt informiert, also im Wesentlichen über die Rücknahmewerte für die Verkäufer und die Kaufpreise für die Käufer. Hierauf folgt das eigentliche Experiment. Dieses besteht gewöhnlich aus einer Reihe von »Handelsphasen«, in denen jeder Teilnehmer abhängig von seinen Transaktionen Geld verdient. Eine einzelne Phase dauert drei bis zehn Minuten, die gesamte Sitzung ungefähr zwei Stunden. Außer bei Finanzmärkten wird das Modell nach jeder Handelspha-

Wie dieses Experiment mit einem Warenmarkt zeigt, verhalten sich Marktteilnehmer aus Fleisch und Blut – hier Studierende aus Grenoble, die dadurch motiviert sind, dass sie ihre Gewinne nach dem Spiel behalten dürfen – exakt so, wie es ökonomische Modelle vorhersagen: Die Preise der Transaktionen (rote Linie) konvergieren gegen den Gleichgewichtspreis (weißer Strich).



ALLE GRAFIKEN: POUR LA SCIENCE

Der Ökonom Vernon L. Smith (links) und der Psychologe Daniel Kahneman (Mitte) erhielten 2002 den Wirtschaftsnobelpreis für die Etablierung experimenteller Methoden in der Ökonomie. Noch wenige Jahre zuvor hatte der »Vater der modernen Wirtschaftswissenschaft« und Nobelpreisträger von 1970, Paul Samuelson (rechts), genau das für unmöglich erklärt.

se wieder in den Ausgangszustand versetzt, sodass Angebot und Nachfrage in einer gegebenen Periode nicht von den Ereignissen der vorhergehenden Perioden abhängen.

Nach der Theorie des freien Marktes nähern sich Käufer wie Verkäufer, indem sie ihre individuelle Nutzenfunktion zu maximieren versuchen, rasch dem Gleichgewichtspreis. Wie bereits erklärt, ist dies eine hinreichende Voraussetzung dafür, dass der Gesamtmarkt wertschöpfungseffizient arbeitet. Doch überschätzt die Theorie nicht die Rationalität der Marktteilnehmer?

Von Natur aus stabile Märkte

Offensichtlich nicht. Wie sich in den vergangenen Jahren zeigte, geschieht das Wunder der unsichtbaren Hand im Labor genauso wie im theoretischen Modell. Märkte für kurzlebige Güter konvergieren rasch gegen den Gleichgewichtspreis (Bild links) und verharren dort, selbst wenn die Experimentatoren sie zu destabilisieren versuchen.

Plötzliche Veränderungen von Angebot oder Nachfrage kommen in der Realität häufig vor. Auf einem Markt für gebrauchte Bücher erschienen neue Anbieter, die ihre verloren geglaubten Bücher wiedergefunden haben, oder ein Professor erregt neue Nachfrage, indem er ein anderes Lehrbuch empfiehlt. Das bilden die Forscher in ihren Experimenten nach, indem sie von einer Handelsphase zur nächsten die Rücknahme- und Ausgabepreise verändern. Die Umwelt des fiktiven Marktes ist also nicht länger unveränderlich, sondern unterliegt Schwankungen und Zyklen.

Sogar die Auswirkung von Katastrophen lässt sich erforschen, seien sie von außen verursacht wie der Terroranschlag vom 11. September 2001, der die Nachfrage nach Flugreisen einbrechen ließ, oder durch die Marktteilnehmer selbst herbeigeführt wie die Einführung der Dampfmaschine in die Textilindustrie des 19. Jahrhunderts, wodurch die Nachfrage nach der Arbeitskraft der Weber zusammenbrach.

Arlington Williams von der Universität von Indiana und Vernon Smith untersuchten 1984 einen experimentellen Markt, auf dem sich Angebot und Nachfrage zyklisch so ändern, dass ihnen immer abwechselnd zwei Gleichgewichtspreise entsprachen (Spektrum der Wissenschaft 2/1993, S. 68). In der Realität könnte sich zum Beispiel der Markt für Badekleidung so verhalten, denn da liegen Angebot und Nachfrage im Winter niedrig und im Sommer hoch. Der fiktive Markt passte sich jeder Phase mit bemerkenswerter Effizienz an: Wenn sowohl Angebot als auch Nachfrage zyklisch verlaufen, erreicht die tatsächliche Wertschöpfung rund 99 Prozent des maximal möglichen Wertes.

Zusammen mit Doug Davis von der Virginia Commonwealth University in Richmond und Glenn Harrison, damals an der Universität von South Carolina, ging Williams 1993 noch einen Schritt weiter: Die Forscher wiesen nach, dass die Anpassung auch dann funktioniert, wenn die Zyklen nur das Angebot oder nur die Nachfrage betreffen, sodass abwechselnd Überproduktion und Güterknappheit herrschen. Im Jahre 1997 zeigten Julian Jamison von der Northwestern University und Charles Plott vom California Institute of Technology, dass Märkte unter rein zufälligen exogenen Störungen immer noch eine Effizienz von etwa 98 Prozent erreichen. Schließlich untersuchten wir 2001 zusammen mit Céline Jullien von der Universität Grenoble den Fall eines Marktes, der endogenen Störungen unterworfen ist. So konnten die Verkäufer Geld in günstigere Produktionsmethoden investieren, mit der Aussicht, ihre Gewinnspanne zu steigern. Wie sich zeigte, erfolgen die Preisanpassungen langsamer als bei exogenen Störungen, aber die Markteffizienz bleibt sehr hoch: Sie liegt auch nach den Umwälzungen jederzeit über 93 Prozent.

Der Markt unter Druck

Da sich Marktumwelt und Institution im Labor beliebig variieren lassen, kann man Märkte bis an die Grenzen ihres Funktionierens treiben. Man kann zum Beispiel fragen, welche Mindestanzahl von Käufern und Verkäufern erforderlich ist, damit der Wettbewerb funktioniert und der Markt das Gleichgewicht erreicht. Es sind sehr wenige, wie sich sowohl bei Posted-Offer-Märkten als auch bei Doppelauktionen gezeigt hat. Vernon Smith zeigte bereits 1982, dass vier Käufer und vier Verkäufer genügen.

Nun wäre es denkbar, dass die Labormärkte nur deshalb so stabil sind, weil sie – entgegen der Realität – vom Rest der Welt isoliert sind. Daher haben Ökonomen auch Wirtschaftsräume aus mehreren miteinander gekoppelten Märkten simuliert. Eine solche Kopplung kann in einer »Produktionsfunktion« bestehen, die angibt, wie viele Einheiten eines auf einem Markt gehandelten Gutes (Beispiel: Stahl) sich in ein Produkt eines anderen Marktes (ein Auto) verwandeln lassen. Oder die Kopplung verläuft über die Nachfrage nach voneinander abhängigen Gütern: Wer ein Auto gekauft hat, weist dem Benzin einen größeren Wert zu als ein Radfahrer. Bislang gibt es nur wenige solcher Arbeiten; aber sie zeigen sämtlich eine – wenn auch langsamere – Konvergenz gegen den Gleichgewichtspreis, und die Effizienz der gekoppelten Märkte liegt ebenfalls nahe dem Optimum.

Was die mikroökonomische Theorie über die Märkte vorhersagt, lässt sich also ▷

mit gängigen Umwelten und Institutionen im Labor ohne weiteres bestätigen. Dabei ist die Effizienz gegenüber zahlreichen als schädlich geltenden Einflüssen erstaunlich robust. Sie bleibt erhalten bei starker Verkleinerung der Teilnehmerzahl, bei sehr ungleicher Verteilung des Profits, unter starken Schwankungen von Angebot und Nachfrage, exogenen oder endogenen Störungen, finanziellen Hürden für den Markteintritt, Verkoppelung von Märkten und der Einführung von Transaktionskosten wie etwa Steuern.

Es sieht also nicht so aus, als ob Gütermärkte nur unter stark idealisierten und einschränkenden Voraussetzungen effizient wären. Ganz im Gegenteil: Es handelt sich offensichtlich um ein allgemeines Phänomen, das unter sehr vielen Umständen Bestand hat. Selbst wenn die Bedingungen extrem ungünstig werden, entfernt sich ein Nichtfinanzmarkt nie sprunghaft von seinem effizienten Gleichgewicht, sondern nur allmählich.

Schließlich bleibt die Wertschöpfung sogar dann hoch, wenn die Marktteilnehmer sehr unvernünftig handeln, indem sie zu Beginn einer Handelsphase völlig abwegige Preisvorstellungen äußern; denn noch während dieser Handelsphase pflegt der Gleichgewichtspreis sich rasch durchzusetzen. Anscheinend sind die Hypothesen über das rationale Verhalten der Marktteilnehmer entbehrlich: Die Institution des Marktes ist »intelligenter« als seine Teilnehmer und gleicht deren irrationales Verhalten aus. Dass die Gütermärkte hinsichtlich ihrer Effizienz so robust sind, ist obendrein eine gute Nachricht für diejenigen Ökonomen, welche die notwendigen Bedingungen für das reibungslose Funktionieren eines freien Marktes vollständig aufzuzählen versuchen: Wahrscheinlich sind sie gar nicht so restriktiv, wie man lange angenommen hat.

Getrübt wird die Freude jedoch, wenn man statt Märkten für Konsumgüter Finanzmärkte betrachtet. Was unterscheidet diese zwei Typen von Märkten, und was bedeutet dies für entsprechende Laborexperimente?

Die Ineffizienz der Finanzmärkte

Konsumgüter wechseln normalerweise nur einmal den Besitzer. Finanzprodukte dagegen haben eine viel längere Lebensdauer und können beliebig oft gehandelt werden. Auf Gütermärkten sind Angebot und Nachfrage während einer Handelsperiode begrenzt: Man kann nicht beliebig viele Äpfel ernten und vor allem nicht beliebig viele essen. Irgendwann ist also der Markt geräumt, weil alle überhaupt möglichen profitablen Geschäfte stattgefunden haben – zumindest für diese Handelsperiode. Aber da man Aktien nicht essen kann, gibt es für sie keinen Endverbraucher. Auf Wertpapiermärkten hat der Austausch kein natürliches Ende.

Auf Nichtfinanzmärkten steht von Anfang an – noch vor der Preisbildung – fest, wer als Käufer und wer als Verkäufer auftritt. Ein Tomatenzüchter kann nur verkaufen, egal welcher Preis herrscht. An den Wertpapierhandelsplätzen dagegen steht es jedem Teilnehmer frei, je nach Marktlage zu kaufen oder zu verkaufen.

Der letzte, entscheidende Unterschied zwischen den beiden Markttypen: Wer Sachgüter handelt, weiß genau, welchen Nutzen er ihnen zuschreibt. Im Fall von Wertpapieren kennen einige oder gar alle Beteiligten diese Größe nicht. Überdies gibt es auf Finanzmärkten Insider, die über den Wert der Handelsobjekte besser informiert sind als die übrigen Teilnehmer.

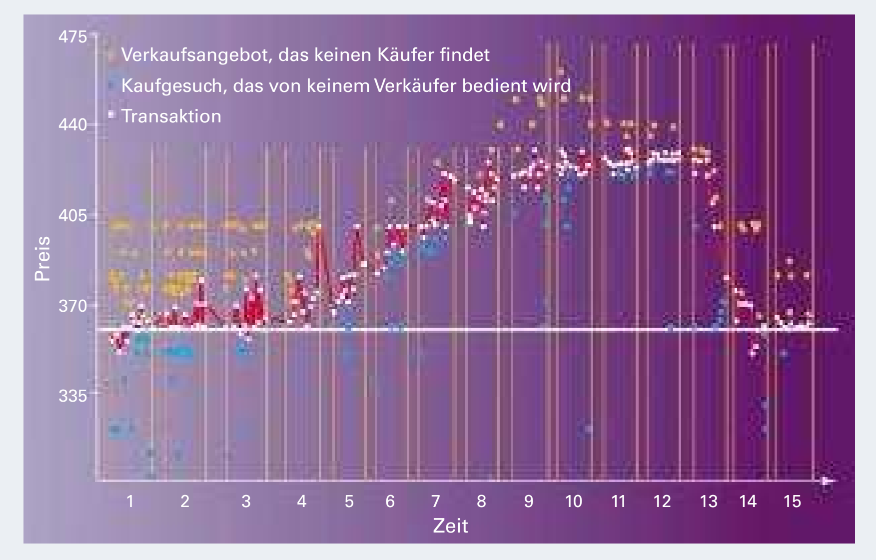
Daher kann man die Effizienz eines Wertpapiermarkts nicht an der Wertschöpfung messen. Es gibt nämlich keine! Ein Gut wird gehandelt, weil der Käufer ihm einen höheren Wert – genauer: einen höheren Nutzen – beimisst als der Verkäufer (Bild rechts), und die Differenz ist die Wertschöpfung, wie wir oben definiert haben. Aber der einzige Nutzen eines Wertpapiers besteht in dem Geld, das es einbringt – bei der Dividendenzahlung oder beim Verkauf –, und der ist vielleicht unsicher oder gänzlich unbekannt, aber für alle Marktteil-

Der Börsenkrach im Labor

Bei Experimenten mit simulierten Finanzmärkten treten regelmäßig und unweigerlich Spekulationsblasen auf. Bei dem dargestellten Versuch sind die Probanden eingeladen, eine Anzahl von Perioden – hier 15 – mit einer fiktiven Aktie zu handeln. Am Ende jeder Handelsperiode wird dem Besitzer jeder Aktie eine Dividende ausgezahlt, die auch negativ ausfallen kann. Sie wird vom Zufall bestimmt und liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von je 25 Prozent bei 36, 4, –24 oder –16. Der Erwartungswert des Ertrages beträgt also null. Am Ende des Experiments wird jedes Papier zu einem Preis von 360 Einheiten zurückgenommen. Somit liegt der Fundamentalwert des Papiere konstant bei 360 (weißer Strich).

Gleichwohl steigen die Preise (die durch die rote Linie verbundenen weißen Punkte) weit über diesen Wert und stürzen dann (in Periode 13) sehr plötzlich ab.

Der aktuelle Marktpreis eines Wertpapiers gibt dessen »fundamentalen«, den wirtschaftlichen Tatsachen entsprechenden Wert also nur unzureichend wieder. Finanzmärkte scheitern regelmäßig an der Bewertungsaufgabe, die ihnen unsere Volkswirtschaften zuschreiben.



Wertschöpfung bei Finanzgeschäften ist nicht von vornherein ausgeschlossen. Vielleicht kann der Käufer eines Unternehmens mehr damit anfangen als der Verkäufer – wenn er es nicht nur wieder verkaufen will.



nehmer derselbe. Wenn alle über dieselbe Information verfügen, zum Beispiel über den Zustand des Unternehmens, dessen Aktien gehandelt werden, müssten sie eigentlich auch zu derselben Einschätzung über diesen Nutzen kommen.

Warum findet dann an den Finanzmärkten überhaupt ein Austausch statt? Liegt es daran, dass Geldanlagen mit Risiko behaftet sind und die Beteiligten dieses Risiko unterschiedlich bewerten? Wohl kaum, denn man kann sich, wie die Ökonomen gezeigt haben, durch ein geeignet zusammengesetztes Portfolio gegen Risiken absichern. Auch spielt es, wie man belegen kann, keine Rolle, dass manche Marktteilnehmer eine höhere Präferenz für liquide Mittel besitzen, ihr Geld also ungern für längere Zeiträume anlegen. Welche Erklärung bleibt also?

Offenbar besitzen die Marktteilnehmer unterschiedliche Informationen zu den gehandelten Papieren und ziehen daraus auch unterschiedliche Schlüsse. Demnach ist zwar der tatsächliche oder »fundamentale« Wert einer Aktie für alle derselbe, aber da dieser unbekannt ist, bildet sich jeder auf Grundlage der für ihn zugänglichen, bruchstückhaften Informationen ein anderes Urteil.

Als für Finanzmärkte zutreffendes – und wesentliches – Zielkriterium bleibt also, mangels Wertschöpfung, die Preiseffizienz übrig. Letztere bemisst sich danach, wie nahe der Marktpreis am fundamentalen Preis des gehandelten Papiers liegt. Die klassische Finanztheorie behauptet, dass Wertpapiermärkte es tatsächlich schaffen, den Kurs eines Papiers dem wahren Wert anzugleichen.

Diese Funktion ist von entscheidender Bedeutung, und zwar weit über die Sphäre der Finanzwirtschaft hinaus. Indem der Wertpapierhandel den wahren Wert börsennotierter Papiere ans Licht bringt, stellt er die effiziente Verteilung (die »Allokation«) ökonomischer Ressourcen sicher. Der Markt sorgt dafür, dass die Finanzmittel den leistungsfähigsten Unternehmen zufließen – das ist die Koordinationsfunktion – und veranlasst Firmenchefs, die richtigen Entscheidungen für ihr Unternehmen zu treffen; das ist die Anreizfunktion. Man spricht von »Unternehmensführung durch die Märkte«.

Die Funktion der Finanzmärkte liegt also nicht in der Wertschöpfung, sondern in der Bündelung und Verbreitung von ansonsten nicht zugänglichen Informationen, in der optimalen Allokation von Ressourcen und der Anreizfunktion für die Unternehmen. Daher schenken die Märkte auch den Daten zur Weltkonjunktur, die täglich von Experten und Medien geliefert werden, so große Aufmerksamkeit.

Spekulationsblasen

Nach der herkömmlichen ökonomischen Theorie würde man also erwarten, dass sich auf einem Finanzmarkt eine lokal verfügbare Information rasch unter allen Handelsteilnehmern verbreitet. Angenommen, einige Insider wissen, dass ein Ölunternehmen gerade auf einem seiner Bohrfelder eine neue Lagerstätte entdeckt hat. Wenn sie nun versuchen, Anteilscheine der Firma zu erwerben, treiben sie allein dadurch den Preis in die Höhe – und die anderen Marktteilnehmer werden darauf aufmerksam, dass sich am Fundamentalwert des Unternehmens etwas geändert hat.

Experimente bestätigen diesen Mechanismus zum Teil. So decken Finanzmärkte tatsächlich relativ zuverlässig Informationen auf, die nur einzelnen Personen zugänglich sind. Gleichzeitig unterliegen sie jedoch spekulativen Einflüssen, die den Preis weit vom Fundamentalwert abweichen lassen.

Ein Markt gilt als effizient, wenn er alle Informationen, die für den Fundamentalwert einer Aktie bedeutend sind, zu einer optimalen Schätzung für diesen Fundamentalwert bündelt; optimal heißt, dass es unmöglich ist, aus diesen Informationen eine bessere Schätzung für diesen verborgenen Wert zu gewinnen. Aus dieser Theorie folgt, dass niemand den Fundamentalwert genauer kennt als der Markt selbst! Doch damit ist Letzterer in gewisser Weise Richter und Partei in einem – und wie kann man dann seine Effizienz beurteilen?

Aus dieser Zwickmühle befreien sich die Forscher wieder mit Hilfe von Laborexperimenten. Sie basteln sich ein fiktives Unternehmen, dessen Fundamentalwert sie demzufolge kennen, aber ihren Versuchspersonen nicht verraten, und beobachteten, ob der experimentelle Finanzmarkt diesen Preis findet. Ernüchterndes Resultat: Er tut es nicht!

Das Resultat ist noch einigermaßen erfreulich für Märkte, an denen Wertpapiere sehr kurzer Lebensdauer gehandelt werden. Diese arbeiten effizient und bilden Preise in der Nähe des fundamentalen Wertes. Offensichtlich ähneln die kurzfristigen Anlagen leicht verderblichen Gütern wie Erdbeeren: Den Marktteilnehmern fehlt die Zeit für Spekulationen, da die Papiere nur für zwei oder drei Handelsphasen existieren.

Das ändert sich radikal, sobald die Zahl der Handelsphasen im Experiment der Realität näher kommt. Die ersten Versuche dieser Art hat 1988 abermals Vernon Smith durchgeführt; andere haben sie mittlerweile mannigfach und mit vielen Variationen reproduziert und die Ergebnisse im Wesentlichen bestätigt. Typischerweise lässt man die Versuchspersonen fiktive Wertpapiere mit einer Lebensdauer von etwa fünfzehn oder dreißig ▷



▷ Marktphasen handeln. Dabei wirft das jeweilige Papier bei jedem Durchgang eine Dividende ab. Sie ist die einzige Quelle »intrinsischen Wertes«, das heißt, sie bestimmt den Fundamentalwert der Anlage. Jeder Handelsteilnehmer bekommt dieselbe Dividende ausgezahlt, und alle wissen genau, wie diese zu Stande kommt (Bild S. 66).

Wichtigstes Resultat: Anstatt sich dem Fundamentalwert des Papiers zu nähern und dort zu verharren, wächst der Marktpreis den größten Teil der Zeit bis weit über den Fundamentalwert, um dann rasch und heftig abzustürzen. Dies geschieht, obwohl jeder Teilnehmer, anders als in der Realität, den fundamentalen Wert kennt, was eine Überhitzung des Marktes von vornherein ausschließen sollte. Dennoch entstehen die Spekulationsblasen bei den unterschiedlichsten Umweltbedingungen und Marktinstitutionen. Ronald King und seine Kollegen von der Washington-Universität in St. Louis (Missouri) untersuchten 1993, was geschieht, wenn Leerverkäufe – also der Verkauf von Papieren, die man noch gar nicht besitzt – oder der Wertpapiererwerb auf Kredit zulässig sind, wenn alle Marktteilnehmer mit der gleichen Ausstattung starten, wenn man den Umfang der Preisschwankungen beschränkt oder wenn man auf die Transaktionen Steuern erhebt, wie dies James Tobin für die internationalen Kapitalmärkte vorgeschlagen hat. Nichts von alledem konnte die Spekulationsblasen verhindern.

Forscher unter Mark von Boening an der Universität von Mississippi haben die Einführung einer Clearingstelle für Finanzmärkte angeregt: Dort reichen Käufer und Verkäufer für jede Handelsperiode ihre Aufträge ein, versehen mit einem Mindestpreis bei den Verkäufern und einem Höchstpreis bei den Käufern; auf deren Grundlage berechnet die Clearingstelle nach dem klassischen Verfahren (Bild S. 62) den Gleichgewichtspreis und führt alle Aufträge aus, die zu diesem Preis zulässig sind. Auch diese Institution verhindert nicht das Auftreten von Spekulationsblasen.

Die Doppelauktion ist demnach nicht die einzige Institution, die irrationale Ausschläge begünstigt. Bisher ist nur eine einzige, sehr restriktive Bedingung bekannt, die spekulative Marktausschläge zuverlässig unterdrückt: Man nehme eine Gruppe sehr ähnlicher Personen, die sämtlich zuvor an mindestens zwei Sitzungen teilgenommen haben, auf denen der gleiche Typ Wertpapier gehandelt wurde.

Gemeinsam ins Verderben

Diese Erkenntnisse zeigen deutlich, wie schwierig es für Finanzmärkte ist, Informationen zu sammeln und zu verbreiten. Selbst wenn die Marktteilnehmer genau wissen, dass ein Wertpapier überbewertet ist, hoffen sie auf einen weiteren Marktaufschwung, nach dem Motto: »Solange ich gewinne, spiele ich weiter.« Die Teilnehmer entscheiden also nicht einfach anhand ihres Wissens über den Fundamentalwert der Handelsobjekte – deswegen verbreitet sich dieses Wissen so schlecht –, sondern auf Grund ihrer Annahmen über das Verhalten der anderen Teilnehmer. Sie gehen davon aus, dass diese den Preis weiter nach oben treiben, und kaufen heute eine Aktie für 100 Euro, die gestern 99 Euro gekostet hat – in der Hoffnung, morgen 101 Euro dafür zu erlösen. Mit im Markt vorhandenen Informationen hat dies nichts mehr zu tun.

Jeder glaubt, dass er immer noch leicht verkaufen kann, wenn die Hausse nachlässt – eine Überzeugung, die durch die bisherige Erfahrung bestätigt wird, jedoch den Masseneffekt verkennt: Wenn alle sich zeitgleich ebenso verhalten wie er selbst, kann der Markt das Angebot nicht mehr aufnehmen, und die Kurse stürzen ab. Doch auch diejenigen, die diese Gefahr erkennen, spielen das Spiel oft mit, weil sie darauf vertrauen, dass sie rechtzeitig aussteigen können. Auf einem Finanzmarkt geht es also ähnlich zu wie im Straßenverkehr: 80 Prozent gehen am Steuer Risiken ein, weil sie sich zu den besten zwanzig Prozent der Autofahrer zählen.

Das Ergebnis ist bedrückend: Es ist zweifelhaft, ob die Finanzmärkte die Funktionen erfüllen, die unsere Gesellschaft ihnen zuweist und die keine andere Institution erfüllen kann. Das Problem besteht darin, dass der Marktpreis die Akteure über den Wert der gehandelten Papiere informieren soll; aber die Akteure steuern den Preis durch ihr Verhalten selbst. Dieser geschlossene Kreis führt dazu, dass der Markt sich selbst täuschen kann: Wenn alle kaufen, steigen die Preise, was einen Anreiz zum Kaufen bietet, und so weiter.

Es wäre übertrieben zu behaupten, dass die Laborexperimente zur Effizienz oder Ineffizienz von Märkten bereits endgültige Antworten geliefert hätten. So weiß man nicht, ob Gütermärkte auch dann noch stabil sind, wenn, wie in der Realität, Millionen von Menschen daran teilnehmen. Immerhin weiß man, wie man unter günstigen Umständen die Institution eines Gütermarktes so gestaltet, dass er effizient arbeitet. Das sollte man nicht unterschätzen.

Dagegen sind Finanzmärkte viel anfälliger für Störungen. Noch ist es niemandem gelungen, auch nur einen einzigen fiktiven Finanzmarkt zum effektiven Funktionieren zu bringen. Das heißt nicht, dass dies unmöglich ist – aber nobelpreisverdächtig wäre eine solche Leistung allemal. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Bernard Ruffieux ist Professor für Volkswirtschaftslehre an der École nationale supérieure de génie industriel (ENSGI) in Grenoble. Er leitet das dem Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) angehörige Labor für angewandte Wirtschaftswissenschaften in Grenoble (GAEL).

Un enseignement majeur de l'économie expérimentale des marchés: marchés non financiers et marchés financiers s'opposent en matière d'efficacité. Von C. Noussair, S. Robin und B. Ruffieux in: Revue économique, Bd. 53, S. 1051-74, 2002

Paving Wall Street. Experimental economics and the quest for the perfect market. Von Ross Miller. John Wiley, New York 2002

Price bubbles in laboratory asset markets with constant fundamental values. Von C. Noussair, S. Robin und B. Ruffieux in: Experimental Economics, Bd. 4, S. 87-105, 2001

The handbook of experimental economics. Von John H. Kagel und Alvin E. Roth (Hg.). Princeton University Press, 1995

Experimental economics. Von Douglas D. Davis und Charles A. Holt. Princeton University Press, 1993

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PIXBYTE

Die Mathematik gegen Spam

So genannte Wahrscheinlichkeitsfilter sollen lästige Werbung eliminieren.

Von Edgar Lange

Ein Mausklick genügt und Laura Betterly hat wieder einmal Millionen von E-Mails in alle Welt verschickt – ungefragt. Die 41-jährige Amerikanerin verdient ihr Geld mit dem massenhaften Versand unangeforderter elektronischer Werbung, so genannter Spam. Die nötigen E-Mail-Adressen lieferte ihr wahrscheinlich eine spezielle Suchmaschine aus dem World Wide Web.

Antworten nur zehn von einer Million Empfänger, hat sich der Aufwand für ihre Auftraggeber bereits gelohnt. Dem großen Rest der Internetnutzer weltweit aber gehen die Angebote erotischer Bilder, günstiger Potenzmittel oder attraktiver Finanzkonzepte nicht nur auf die Nerven – sie kosten auch Zeit und Geld. Spam macht inzwischen rund die Hälfte des weltweiten E-Mail-Volumens aus. Über sieben Milliarden elektronische Werbebriefe kursieren laut den Marktforschern der International Data Corporation täglich im Internet und belegen Datenleitungen. Nach Schätzungen der Europäischen Union verursacht diese Flut weltweit einen volkswirtschaftlichen Schaden von zehn Milliarden Euro pro Jahr. Denn auch wenn jeder Löschklick nur eine Sekunde dauert, benötigen die Empfänger einer Million Müll-Mails ganze sieben Mannwochen zum Löschen.

Rund 120 Unternehmen bieten derzeit Software gegen Spam an. Eine mögliche Programmvariante basiert auf einer Datenbank im Internet, in der Spam-Empfänger die Absendeadresse hinterlegen. Das Programm auf dem PC fragt beim Erhalt elektronischer Post nach, ob diese bereits registriert ist, der Abtransport in den elektronischen Mülleimer erfolgt dann automatisch und kostet nur etwas Prozessorleistung. Doch weil Laura Betterly und ihre Kollegen immer neue Absendeadressen generieren, flutschen nicht wenige Spams durch dieses Netz.

Einen anderen Weg gehen Programme, die eine Werbe-Mail auf Grund des Inhalts als solche erkennen. Ihre Klassifikationsalgorithmen beruhen vor allem auf Textanalysen, also dem Suchen nach Schlüsselworten in Verbindung mit Wahrscheinlichkeiten. Die Bayes'sche Analyse ist eine solche Technik (siehe Kasten rechts). Anhand der statistischen Häufigkeit, mit der bestimmte Wörter in Texten verschiedener Klassen auftreten, ordnet sie einen noch unbekannten Text ein. Diese Methode hat sich das Ratinger Softwareunternehmen Pixbyte zu Nutze gemacht, um Spams zu filtern. International bekannt geworden ist das Unternehmen, das als Garagenfirma begonnen hat, durch Lizenzprodukte für Digitales Video. Seit 2002 entwickelt es selbst Software für die E-Mail-Sicherheit.

Gemeinsamkeit macht stark

Die Massen-Mail-Versender schlafen freilich nicht. Sie versuchen beispielsweise die Bayes-Filter zu verwirren: Der E-Mail werden Auszüge aus Romanen oder Zeitungsartikeln hinzugefügt. Statt »Angebot« schreiben die Versender »A.n.g.e.b.o.t« oder fügen zwischen den Buchstaben Kommentare in der Internet-Programmiersprache HTML ein, die auf dem Bildschirm nicht dargestellt werden, aber Schlüsselworte unkenntlich machen. Werbeaussagen können auch in ein Bild integriert werden, statt sie als Textdatei zu verfassen; damit entziehen die Versender sie gänzlich der Erkennung durch die Programme.

▼ **Mehr als sieben Milliarden elektronische Werbebriefe belegen täglich Datenkapazität im Internet. Heuristische Spam-Filter klassifizieren eingehende Mail nach Begriffen wie »Viagra« oder »Offer«. Doch wenn diese Worte nicht als Text enthalten sind, sondern als Teil von Bildern, müssen andere Verfahren herangezogen werden.**







Der Satz von Bayes

Kennt man die absoluten Wahrscheinlichkeiten P für das Eintreten der Ereignisse A und B, zudem auch noch die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass A eintritt, wenn B bereits gegeben ist, dann lässt sich mit dem Bayes'schen Satz der Umkehrschluss ziehen. Mathematisch formuliert gilt dann $P(B|A) = P(A|B) \times P(B) / P(A)$.

Diese Formel des Briten Thomas Bayes (1702–1761), Theologe mit großem Interesse an der Mathematik, bietet eine gute Grundlage, um Mails als Spam beziehungsweise Nicht-Spam zu klassifizieren.

So kommt beispielsweise der Begriff »Hypothek« in 3000 Spams im Mittel 400-mal vor, in 300 erwünschten Anschreiben aber nur fünfmal. Demnach liegt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Mail, die dieses Wort enthält, unerwünschte Werbung ist, bei: $(400 / 3000) / (5 / 300 + 400 / 3000) = 0{,}8889$, also knapp 89 Prozent.

Das Verfahren funktioniert auch mit Wortkombinationen. Hat der Begriff »Viagra« eine Spam-Wahrscheinlichkeit von neunzig, »Firewall« hingegen nur von fünf Prozent, resultiert beim gleichzeitigen Auftreten beider Begriffe in einer Mail ein 32-Prozent-Risiko für Spam.

Für jedes Wort muss freilich eine entsprechende Nutzungshäufigkeit ermittelt werden, bevor Nachrichten mit dieser Methode gefiltert werden können. Als Datenmaterial dienen ausgehende Benutzerpost und Analyseergebnisse bekannter Spam-Mitteilungen. So hat etwa das Wort »Sex« alleine eine Spam-Wahrscheinlichkeit von 97 Prozent; kommt es in Verbindung mit »sexy« vor, so steigt sie schon auf 99,97 Prozent. Gute Antispam-Programme müssen freilich lernfähig sein, um auch negative Spam-Indikatoren zu verrechnen und so die Treffsicherheit zu erhöhen.

Im Wettlauf gegen den Ideenreichtum der Spammer versprechen aber zwei neue Technologien Erfolg: Statistical Token Analysis (STA) und Distributed Checksum Clearing House (DCC). STA vergleicht Spam mit No-Spam nicht nur anhand von Worten, sondern auch nach HTML-Zeichenfolgen wie »color=red« – die Farbe Rot wird in Erotik-Spams gern verwendet. Die Klassifikation erfolgt dann über einen Bayes-Algorithmus.

Sozusagen auf höherer Warte arbeitet DCC. Es ermittelt für jede eingehende E-Mail eine spezielle Prüfsumme, die so genannte Checksum, und schickt nur diese – nicht aber den Inhalt – an einen zentralen Server, der sie mit seiner Datenbank abgleicht. Das Verfahren ist so empfindlich, dass schon die Abweichung in einem Bit der Mail genügt, um eine andere Prüfsumme zu erzeugen. Deshalb lässt sich schnell prüfen, ob und wie oft eine E-Mail bereits durch andere Empfänger registriert wurde – ein hoher Wert spricht für Spam.

Zur effektiven Spam-Bekämpfung benötigt man mehrere dieser Verfahren gleichzeitig. Deshalb kommen in den Spam-Filtern von Pixbyte etwa 500 unterschiedliche Tests zum Einsatz. Normalisierungsfunktionen bereiten Mails vor, indem sie beispielsweise aus einem verschleierten »F1rewall« ein »Firewall« machen oder eingestreute Zeitungsartikel herausfiltern. Die Ergebnisse der Tests werden nach einem genau abgestimmten Punkteschema bewertet. Kriterien, die häufig in Spams und selten in erwünschten E-Mails anzutreffen sind, erhalten höhere Punktzahlen. Überschreitet die Punktesumme einer E-Mail einen Schwellenwert, so wird sie als »wahrscheinlich Spam« eingestuft. Freilich sollte falscher Alarm, im Expertenjargon falsch positive Ergebnisse, weit gehend ausgeschlossen sein, damit Geburtstagsgrüße nicht zusammen mit zwielichtigen Angeboten in der elektronischen Abfalltonne landen. Immerhin sind die mathematisch basierten Methoden mittlerweile so gut, dass nur fünf von tausend Spams durchgehen und Fehlalarme nahezu gegen null tendieren. Da muss sich Miss Betterly wohl bald einen neuen Job suchen. ◁

Der Ingenieur **Edgar Lange** ist freier Fachjournalist für Technikthemen.



Barrow (Alaska)



Alert (Kanada)



Spitzbergen (Europa)

Verschmutzung der Pole mit Quecksilber

Die globale Erwärmung lässt nicht nur das Eis an den Polen schmelzen. Sie scheint indirekt auch dafür zu sorgen, dass sich ausgerechnet in diesen abgelegenen, ökologisch sensiblen Regionen neuerdings giftiges Quecksilber aus der Luft im Schnee ansammelt.

Von Ralf Ebinghaus, Christian Temme und Jürgen W. Einax

Die polaren Ökosysteme sind die letzten weithin unberührten Gebiete der Erde. Auch die Luft ist hier noch kaum mit vom Menschen verursachten (anthropogenen) Schadstoffen belastet. Das verwundert nicht – schließlich liegen die hoch industrialisierten Regionen Eurasiens und Amerikas in weiter Ferne. Zudem unterbinden großräumige meteorologische Prozesse in der Regel den Austausch von Luftmassen zwischen gemäßigten Breiten und Polargebieten.

Dennoch lassen sich auch in diesen abgelegenen Regionen mit der modernen chemischen Analytik Luftschadstoffe nachweisen. Dabei findet man die so genannte Hintergrundkonzentration dieser Substanzen: eine Art weltweite Grundbelastung, die kurzfristig kaum schwankt. Deshalb war das Erstaunen groß, als Forscher 1998 in der Zeitschrift »Nature« von einem Phänomen in der kanadischen Arktis berichteten, das später auch in der Antarktis nachgewiesen wurde: den »atmosphärischen Quecksilberrückgängen«. Dabei fällt der Gehalt der Polarluft an dem giftigen Schwermetall plötzlich weit unter das Hintergrundniveau, sodass selbst die empfindlichsten Messgeräte oft fast nichts mehr davon entdecken können. Was das Phänomen noch rätselhafter erscheinen ließ: Es tritt nur in der relativ kurzen Zeit nach dem Wiederauftauchen der Sonne am Ende der monatelangen winterlichen Polarnacht auf, das heißt zu Beginn des arktischen oder antarktischen Frühlings.

Ein globaler Umweltschadstoff

Damit standen plötzlich beunruhigende Fragen im Raum: Was geschieht mit dem Quecksilber, das aus der Atmosphäre verschwindet? Landet es im polaren Ökosystem – und zwar just zu der ökologisch so sensiblen Zeit, wenn das Leben aus seiner monatelangen Winterstarre erwacht? Und sind die Polregionen trotz – oder wegen – ihrer Abgeschiedenheit eine Art Deponie, auf der sich die weltweiten Quecksilber-Emissionen letztendlich ansammeln? Intensive Untersuchungen in den letzten fünf Jahren haben Antworten auf diese Fragen geliefert, über die wir hier berichten wollen.

Quecksilber gilt heute als globaler Umweltschadstoff. In elementarer Form ist es relativ flüchtig und kann so als Dampf auch in die Atmosphäre gelangen, wo es sich erstaunlich lange hält: ein bis zwei Jahre. Damit hat es genug Zeit, sich zumindest über eine komplette Erdhalbkugel zu verteilen. Dass es so lange in der Luft bleibt, liegt an der schlechten Wasserlöslichkeit und geringen chemischen Reaktivität von elementarem Quecksilber. Weltweit untersuchen derzeit viele Wissenschaftler den Ferntransport des Metalls in der Atmosphäre und gehen der Frage nach, wie es sich in giftige, wasser- und fettlösliche organische Verbindungen umwandelt und innerhalb von Gewässern in der Nahrungskette anreichert. Dabei verfeinern sie die Methoden zur Analyse von Quecksilber in den verschiedensten Umweltbereichen, ergründen, wie es mit welchen anderen Stoffen reagiert, und stellen Modelle zu seiner globalen Verteilung auf.

Ihre Ergebnisse bilden die Grundlage für internationale Konventionen sowie Gesetze und Kontrollbestimmungen einzelner Länder. Seit 1990 findet in regelmäßigen Abständen eine internationale



An mehreren Stellen der Polarregionen haben Umweltforscher in den letzten Jahren unter teils extremen Bedingungen den jahreszeitlichen Verlauf der Quecksilbergehalte in der Luft und am Boden ermittelt: an der Station Barrow in Nordalaska, bei Alert in der kanadischen Arktis und auf Spitzbergen (links). Auf der anderen Seite des Globus führten deutsche Wissenschaftler – darunter die Autoren – Untersuchungen an der Station Neumayer durch (rechts). Sie befindet sich zehn Meter unter der Schneedecke, aus der nur die Außenaufbauten wie Lüftungsschächte und Satellitenkuppeln herausragen.

ALFRED-WEGENER-INSTITUT, BREMERHAVEN

Konferenz zum Thema »Quecksilber als weltweiter Umweltschadstoff« statt, mit steigender Teilnehmerzahl. Jüngsten Daten des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (Unep) zufolge wurden die Gesundheitsgefahren durch das Schwermetall bislang deutlich unterschätzt. So scheint die Konzentration dieses Elements im Blut jeder zwölfte US-Amerikanerin über den Grenzwerten zu liegen, was Schädigungen insbesondere bei der Hirnfunktion von Neugeborenen befürchten lässt.

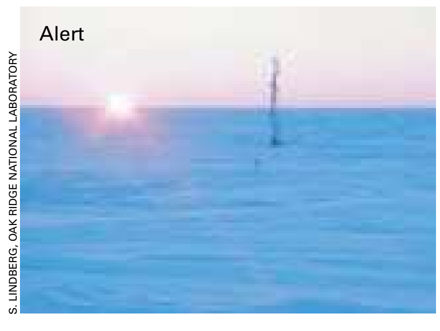
Die Toxizität des Quecksilbers ist schon lange bekannt. Trotzdem führte erst eine große Vergiftungskatastrophe dazu, dass in großem Maßstab umwelt- und gesundheitspolitische Konsequenzen gezogen wurden. Im Jahre 1956 trat bei den Bewohnern der südjapanischen Insel Kiuschu an der Minamatabucht eine bis dahin unbekannte Erkrankung des Nervensystems auf. Fast fünfzig Personen starben, erheblich mehr erlitten dauerhafte Schäden; bis heute gibt es als Spätfolge weitere Todesfälle und Erkrankungen.

Als Ursache stellte sich eine Quecksilbervergiftung heraus. Eine chemische Fabrik hatte von 1932 bis 1986 mehr als 80 Tonnen des Elements in Form seines Sulfats, das als Katalysator bei der Herstellung von Acetaldehyd diente, mit ihren Abwässern ins Meer geleitet. Mikroorganismen wandelten die Verbindung in Methylquecksilberchlorid um, das sich in den Fischen, einem Hauptnahrungsmittel der dortigen Bevölkerung, anreicherte. Bei einem weiteren schweren Unglück verzehrten 1971/72 Menschen im Irak mit Quecksilber gebeiztes Saatgut. Über 6500 erkrankten und fast 500 starben.

In den 1960er und 1970er Jahren fanden sich dann auch stark erhöhte Quecksilbergehalte im Fisch aus Seen in Skandinavien und Nordamerika. Ursache war hier nicht mehr eine lokale, akute Verschmutzung, sondern der Ferntransport des Schwermetalls über die Atmosphäre. Daraufhin verschärften viele Länder ihre Grenzwerte für die Emission von Quecksilber und die maximal zuläs- ▷

IN KÜRZE

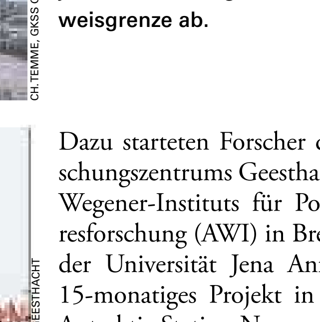
- Messungen seit 1995 ergaben, dass in den Polarregionen jeweils im Frühjahr der **Quecksilbergehalt der Luft** vorübergehend weit unter den normalen Hintergrundpegel sinkt.
- Das Schwermetall verschwindet aber nicht einfach, sondern lagert sich auf Eis und Schnee ab. Dort wird ein großer Teil in **quecksilberorganische Verbindungen** umgewandelt, die Eingang in die Nahrungskette finden können.
- Als unmittelbare Ursache des fatalen Effekts erwies sich der **Abbau von Ozon** durch Brom, das die wiederkehrende Sonne nach der langen Polarnacht aus angesammelten **Meersalz-Aerosolen** freisetzt. Bei diesem Abbau entsteht Bromoxid und reagiert mit Quecksilberdampf zu schwerflüchtigen Verbindungen, die sich leicht ablagern.
- Eigentliche Ursache des Phänomens ist vermutlich die **globale Erwärmung**, die das Wachstum von Brom freisetzenden Algen im Eismeer fördert.



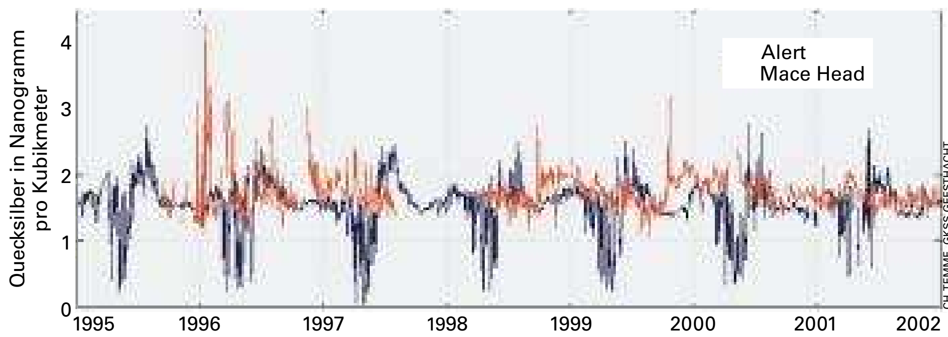
S. LINDBERG, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY



CH. TEMME, GKSS GEESTHACHT



Langjährige Messungen des Quecksilbergehalts der Luft im kanadischen Alert und in der westirischen Forschungsstation Mace Head ergaben einen überraschenden Unterschied: In der Arktis sanken die Werte im Frühjahr jeweils kurzzeitig bis fast an die Nachweisgrenze ab.



CH. TEMME, GKSS GEESTHACHT

sige Menge in Nahrungsmitteln. Außerdem ging man in Teilen Europas sowie Süd- und Nordamerikas – hauptsächlich in den gemäßigten Breiten – dazu über, die Quecksilbergehalte der Atmosphäre zu überwachen. In den Polarregionen ließen die extremen Bedingungen, logistische Schwierigkeiten und hohe gerätetechnische Anforderungen analoge Messungen allerdings lange nicht zu.

Plötzlicher Rückgang im Frühling

So wurde erst 1995 bei der Siedlung Alert in der kanadischen Arktis damit begonnen, die Konzentration von elementarem Quecksilber in der Luft kontinuierlich aufzuzeichnen. Nur wenig später nahm die westirische Forschungsstelle Mace Head Dauermessungen auf. Auf Grund neuer gerätetechnischer Entwicklungen wurde erstmals eine zeitliche Auflösung von fünf Minuten erreicht. Obwohl dreißig Breitengrade zwischen den beiden Stationen liegen, waren die Jahresmittelwerte der gemessenen Konzentrationen fast identisch. Sie zeigten, dass die Hintergrundbelastung auf der Nordhalbkugel bei etwa 1,7 Nanogramm pro Kubikmeter liegt, und stimmten mit älteren Datensätzen von anderen entlegenen Messstellen in der nördlichen Hemisphäre überein.

Doch ein eklatanter Unterschied zwischen den beiden Messreihen tauchte jeweils zu Beginn des arktischen Frühlings auf. Dann gingen die Quecksilbergehalte in der polaren Atmosphäre wiederholt plötzlich für kurze Zeit zurück und sanken deutlich unter die Hintergrundkonzentration. Nichts dergleichen war in den Daten von Mace Head zu erkennen. Ihr zeitlicher Verlauf zeigte nur sehr geringe Schwankungen – im Einklang mit den Erwartungen für eine Messstelle fernab von anthropogenen Einflüssen.

Was war die Ursache der unerwarteten arktischen Quecksilberrückgänge? Einen ersten Fingerzeig lieferte die auffällige Parallelität zu einem anderen, schon länger bekannten Phänomen: Auch die Konzentration des bodennahen Ozons sinkt im polaren Frühling vorübergehend stark ab. Der Vergleich der Kurven für die beiden Substanzen ergab eine geradezu frappierende Übereinstimmung: Innerhalb kurzer Zeiträume fielen die Quecksilber- und Ozonkonzentrationen fast simultan bis nahe an die Nachweisgrenze ab und stiegen nach einigen Stunden ebenso gleichmäßig wieder auf das Ausgangsniveau an (Kasten).

Beim bodennahen Ozon ließen sich die Schwankungen mit photochemischen Abbaureaktionen erklären. Quecksilber ist jedoch ein chemisches Element, das nicht zerstört werden kann, sondern sich auf andere Weise der Messung entziehen muss. Die Vermutung lag daher nahe, dass es aus der Atmosphäre entfernt und auf den Meer-, Eis- oder Landoberflächen deponiert wird.

Doch zunächst galt es zu klären, ob das Phänomen auch am Südpol auftritt. Dazu starteten Forscher des GKSS Forschungszentrums Geesthacht, des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven und der Universität Jena Anfang 2000 ein 15-monatiges Projekt in der deutschen Antarktis-Station Neumayer. Sie liegt im nordöstlichen Bereich des Weddelmeeres auf dem Ekström-Schelfeis und wird ganzjährig vom AWI betrieben.

Die Messungen fanden im 1,6 Kilometer von der Station entfernten Spurenstoff-Observatorium statt und überdeckten den Zeitraum von Januar 2000 bis Februar 2001, also mehr als einen Jahresgang. In der betreffenden Überwinterungsperiode legte die Luftchemikerin Astrid Löwe täglich bei Wind und Wetter den Weg von der Station zum Observatorium zurück, um neben ihrer Routinearbeit die GKSS-Messgeräte zu betreuen.

Zwischen März und Juli 2000 zeigten die Quecksilberwerte kaum Schwankungen und lagen mit durchschnittlich 1,15 Nanogramm pro Kubikmeter im Bereich der Hintergrundkonzentration auf der Südhalbkugel. Im gleichen Zeitraum stiegen die Ozongehalte dagegen kontinuierlich an, da zum antarktischen Winter hin immer weniger ultraviolette Sonnenstrahlung einfiel, die das Gas normalerweise zersetzt.

Nach dem polaren Sonnenaufgang im antarktischen Frühling brach die Quecksilberkonzentration dann mehrfach bis an die Nachweisgrenze von etwa 0,1 Nanogramm pro Kubikmeter ein. Parallel dazu gingen jeweils auch die Ozonwerte drastisch zurück. In den Sommermonaten von Januar bis Februar 2000 und von Dezember 2000 bis Februar 2001 gab es gleichfalls starke Schwankungen der Quecksilberkonzentrationen. Nun aber erfolgten sie gegenläufig zu den Änderungen des Ozongehalts.

Damit bestätigte sich, dass auch am Rande der Antarktis im Frühling die

Quecksilberkonzentration in der Atmosphäre plötzlich absackt. Außerdem besteht dort offenbar derselbe mysteriöse Zusammenhang mit Schwankungen im Ozongehalt. Eine direkte Verbindung zwischen dem Gas und dem Schwermetall war schwer vorstellbar. Demnach musste es eine indirekte Kopplung geben, wobei die Schwankungen in der Konzentration beider Stoffe von einer unbekannten dritten Substanz verursacht werden.

Die Brom-Connection

Schon in den späten 1980er Jahren hatten Forscher um Leonard A. Barrie vom Meteorologischen Dienst Kanadas, der heute bei der World Meteorological Organization in Genf arbeitet, erhöhte Bromkonzentrationen auf Filtermaterial während einzelner troposphärischer Ozonrückgänge entdeckt. Nachfolgende genauere Untersuchungen klärten den Zusammenhang. Danach vermag Brom in einer katalytischen Reaktion mit Hilfe von Sonnenlicht Ozon zu zersetzen (Spektrum der Wissenschaft 1/2001, S. 12). Als Zwischenprodukt entsteht dabei das Bromoxid-Radikal (BrO).

Im Frühjahr kommt es in der arktischen Atmosphäre zu regelrechten Bromexplosionen. Als Grund vermuten Umweltforscher, dass sich in der langen Polarnacht feine Schwebteilchen (Aerosole), die Meersalz enthalten und von der offenen See herangeweht werden, am Rand der Packeiszone ablagern und ansammeln. Sobald die Sonne im Frühling wieder über den Horizont steigt, setzt sie aus diesen Partikeln einzelne Brom- sowie – in deutlich geringerem Maße – Chlor-Atome frei, die dann das Ozon zerstören und dabei Bromoxid bilden.

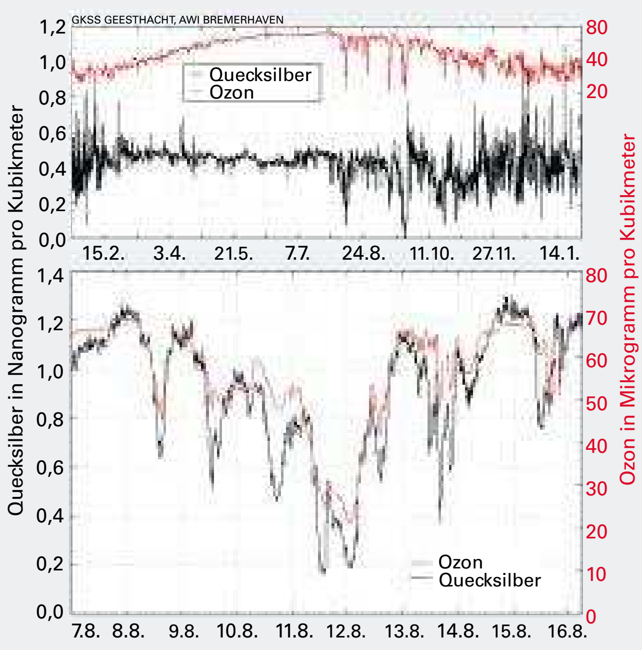
Den Beleg dafür lieferten sowohl Messungen am Boden als auch Daten des Spektrometers Gome *(Global Ozone Monitoring Experiment)* an Bord des europäischen Radarsatelliten ERS-2. Sie zeigten, dass im Frühling an den Polen oft plötzlich hohe Konzentration an Bromoxid auftreten. Im September 2000 lagen die höchsten Werte über dem südlichen Atlantik sowie rund um den antarktischen Kontinent – mit dem Maximum nördlich der Neumayer-Station bis etwa zum 55. Breitengrad.

Bromoxid ist aber seinerseits ein hochreaktives Molekül und kann als solches auch elementares Quecksilber angreifen. Dabei überführt es das Metall in zweiwertige Verbindungen wie das Oxid, die weniger flüchtig und daher besser deponierbar sind. Auf diese Weise könnte es, wie Hacene Boudries vom kanadischen Meteorologischen Dienst in Downsview (Ontario) und Kollegen vor zwei Jahren als Erste vermuteten, die plötzlichen atmosphärischen Quecksilberrückgänge verursachen.

Einjährige Drift mit dem Packeis

Zur Überprüfung der Theorie lag es nahe, am Boden nachzuschauen. Wenn es stimmt, dass der Schadstoff aus der Luft verschwindet, weil er sich im Oberflächenschnee ablagert, müsste seine Konzentration dort zunehmen. Dies nachzuweisen ist jedoch selbst mit den leistungsfähigsten Methoden der Ultraspurenanalytik auch heute noch eine große Herausforderung. Nur sehr weni- ▷

Spurenstoffe im Gleichtakt





Von Januar 2000 bis Februar 2001 verfolgten Forscher aus Bremerhaven, Geesthacht und Jena bei der deutschen Antarktis-Station Neumayer den Verlauf der Quecksilber- und der Ozonkonzentration in der bodennahen Luft (links oben). Dabei registrierten sie im antarktischen Frühling mehrfach fast zeitgleiche Einbrüche in den zwei Kurven, die jeweils die Einstundenmittelwerte zeigen (links unten). Offenbar besteht zu dieser Jahreszeit eine enge Beziehung zwischen dem Quecksilber- und dem Ozongehalt der tiefen Luftschichten. Die Messungen fanden im Spurenstoff-Observatorium statt, das 1,6 Kilometer von der Station entfernt ist und auf Stelzen steht, um nicht vom Schnee zugeweht zu werden (rechts). Im Südsommer waren die Messgeräte in dem eigens aufgestellten roten Container untergebracht, der den Witterungsbedingungen im Winter aber nicht widerstanden hätte.

ge Laboratorien sind in der Lage, diese Art von Untersuchungen durchzuführen. Die Quecksilberkonzentration in unbelastetem Schnee liegt im Bereich von wenigen milliardstel Gramm (Picogramm) pro Gramm Schnee. Derart niedrige Mengen korrekt zu bestimmen, stellt nicht nur höchste Ansprüche an Empfindlichkeit und Genauigkeit der Analysemethode, sondern erfordert auch aufwändige Qualitätssicherungsmaßnahmen, um mögliche Verunreinigungen während der Probenahme und späteren Untersuchung im Labor auszuschließen.

Deshalb gelang es erst 2001 der Gruppe um William H. Schroeder vom kanadischen Meteorologischen Dienst, saisonale Unterschiede der Quecksilberkonzentrationen im Oberflächenschnee aufzuspüren. Von Bord eines kanadischen Eisbrechers, der für ein Jahr im Packeis festlag und mit diesem etwa 500 Kilometer weit südwestwärts driftete, nahmen die Forscher tagtäglich Proben von frisch gefallenem Schnee. Während die Quecksilberkonzentrationen in den dunklen Wintermonaten bei weniger als acht Nanogramm pro Liter lagen, kletterten sie im Frühjahr auf Werte um 35 Nanogramm pro Liter.

Auch in Grönland, der östlichen kanadischen Arktis und der Hudson-Bay-Region sammelten Schroeder und seine Mitarbeiter in zwei Jahren an mehr als dreißig Stellen Schneeproben. Wie sich zeigte, war das Verteilungsmuster der gefundenen Werte über das gesamte Frühjahr hinweg sowohl regional als auch zeitlich eng mit den per Satellit gemessenen Konzentrationen an Bromoxid-Radikalen in der Luft korreliert. Daraus geht klar hervor, dass zwischen den atmosphärischen Quecksilberrückgängen und den erhöhten Bromoxid-Konzentrationen ein Zusammenhang besteht. Außerdem schürt es den Verdacht, dass das giftige Schwermetall in Küstennähe vermehrt in das Ökosystem gelangt.

Steven E. Lindberg und seine Gruppe am Nationallaboratorium Oak Ridge (Tennessee) führten vor zwei Jahren weitergehende Untersuchungen an der Station Barrow durch, die im Norden Alaskas direkt an der Eismeerküste liegt. Mit einem neuartigen Messsystem erfassten sie außer dem gasförmigen elementaren Metall auch Quecksilberverbindungen, die als Schwebstoffe oder Dampf in der Atmosphäre vorlagen. Deren Konzentrationen erwiesen sich bei ersten Messungen als verblüffend hoch: Mit bis zu einem Nanogramm pro Kubikmeter übertrafen sie die anderswo in Nordamerika und Europa gemessenen Werte um den Faktor hundert.

Bis dahin galt als ausgemacht, dass Quecksilberverbindungen nur in unmittelbarer Nähe von anthropogenen Emissionsquellen wie Müllverbrennungsanlagen und Kohlekraftwerken in erhöhten Konzentrationen auftreten können, da sie ja nicht weit transportiert werden, sondern sich schnell ablagern. Fernab jeglicher Zivilisation derart große Mengen in Luftproben anzutreffen, war schlichtweg eine Sensation.

Die genauere Analyse der Daten zeigte, dass die Konzentration an Quecksilberverbindungen in der Atmosphäre erst am Beginn des polaren Frühlings emporschnellte, wenn die Intensität des Sonnenlichts zunahm. Und wie der Vergleich mit Neuschneeproben ergab, stieg parallel dazu auch die Deposition des Schwermetalls an. Damit war der Beweis erbracht, dass das Quecksilber, das aus der Atmosphäre verschwindet, geradewegs in das polare Ökosystem wandert. Nach Abschätzungen von Schroeder sind das über das gesamte Frühjahr hinweg etwa fünfzig bis hundert Tonnen. Für die Antarktis kommen wir auf eine ähnliche Zahl, wenn wir die erhöhten Bromoxid-Konzentrationen auf Satellitenbildern nutzen, um die Quecksilberdeposition zu ermitteln.

Hoher Anteil des Schwermetalls ist »bioverfügbar«

Die entscheidende Frage lautet nun: Führen diese Einträge zu einer Belastung des Ökosystems? Ist das Quecksilber also »bioverfügbar« und gelangt in die Nahrungskette oder findet es keinen Eingang in den biologischen Stoffkreislauf, weil es relativ stabil im Schnee gebunden bleibt?

Ein erster Schritt der Bioakkumulation ist in der Regel die Aufnahme eines Schadstoffes durch Mikroorganismen. Wie leicht das geschieht, hängt beim Quecksilber in hohem Maße von seiner Bindungsform ab: Während schwer lösliche Sulfide oder Selenide nicht resorbierbar sind, gelangen besser wasserlösliche Formen sehr leicht in die Nahrungskette. Dort können sie sich anreichern und unter Umständen in hochgiftige organische Quecksilberverbindungen wie Monomethylquecksilberchlorid umgewandelt werden. Solche Substanzen wurden bislang allerdings nicht im polaren Schnee gefunden.

Karen Scott von der Universität von Manitoba in Winnipeg hat ein Testverfahren entwickelt, mit dem sich der bioverfügbare Anteil von Quecksilber in flüssigen Proben beurteilen lässt. Es arbeitet mit gentechnisch veränderten Bakterien, in denen die Regulatorregion (der Promotor) eines Gens für Quecksil-

März 2000

September 2000

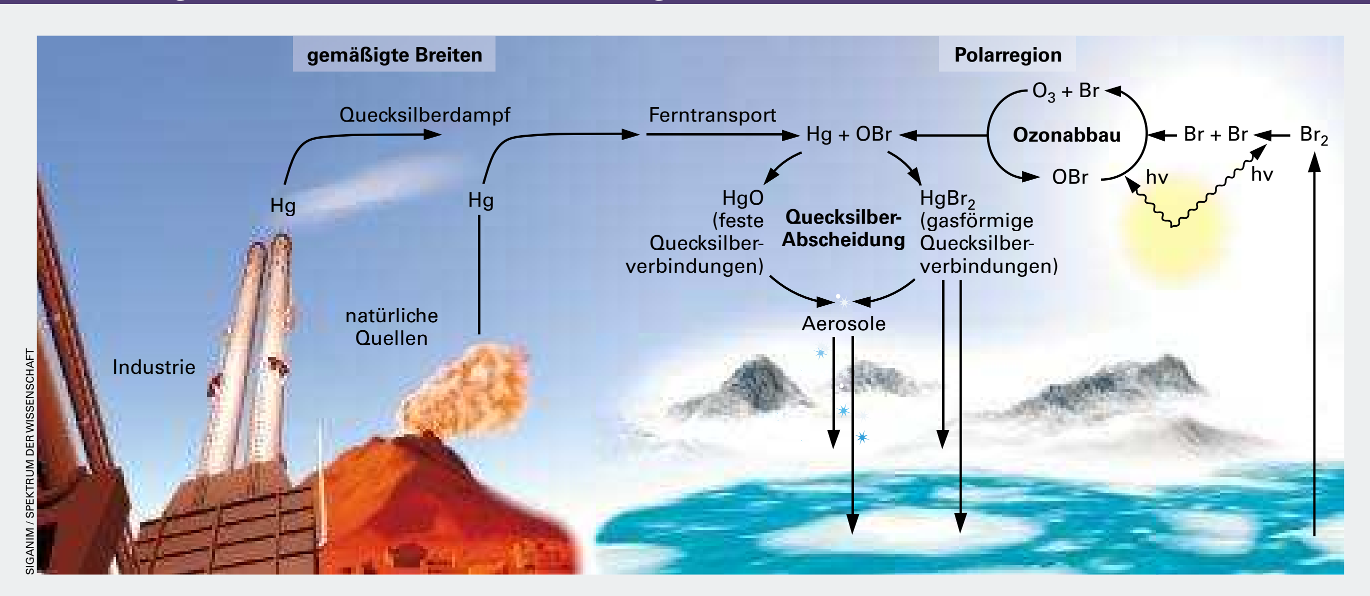
Bromoxid-Moleküle

$8{,}0 \times 10^{13}$
$7{,}5 \times 10^{13}$
$7{,}0 \times 10^{13}$
$6{,}5 \times 10^{13}$
$6{,}0 \times 10^{13}$
$5{,}5 \times 10^{13}$
$5{,}0 \times 10^{13}$
$4{,}5 \times 10^{13}$
$4{,}0 \times 10^{13}$

A. RICHTER, IUP, UNIVERSITÄT BREMEN

Als Bindeglied zwischen den rapiden Konzentrationsschwankungen von Quecksilber und Ozon in der polaren Frühlingsluft erwies sich Bromoxid. Den Beleg dafür erbrachten Daten des Spektrometers Gome an Bord des Radarsatelliten ERS-2. Die Aufnahme vom September 2000 zeigt hohe Konzentrationen von Bromoxid (in Molekülen pro Quadratzentimeter Luftsäule) genau dort, wo auch die Rückgänge im Gehalt der Luft an Quecksilber und Ozon auftreten. Im März dagegen ist fast nichts von dem hochreaktiven Gas zu entdecken.

Der Weg des Quecksilbers ins ewige Eis



Gasförmiges elementares Quecksilber aus Industrie und natürlichen Quellen wie Vulkanen hat eine sehr lange Verweildauer in der Luft. Dadurch kann es sich über die Erdatmosphäre verteilen und auch in die Polarregionen gelangen. Dort wird es jedes Frühjahr über einen komplizierten Reaktionszyklus »ausgefällt«. In der langen winterlichen Polarnacht sammeln sich nämlich am Rand des Packeises Meersalz-Aerosole an. Sobald die Sonne wiederkehrt, setzt sie daraus Brom-Atome frei, die in einem Kreislauf Ozon zerstören und dabei intermediär Bromoxid bilden. Dieses Gas wandelt das elementare Quecksilber in der Luft in Verbindungen wie das Oxid und das Bromid um, die wasserlöslich oder schwerflüchtig sind. In dieser Form kann das Schwermetall entweder direkt aus der Luft ausgewaschen werden oder sich an Aerosolteilchen binden und mit diesen zusammen ablagern.

berresistenz mit dem Gen für das Enzym Luciferase gekoppelt wurde. Nur der tatsächlich bioverfügbare Anteil unter der Gesamtheit aller Quecksilberverbindungen sollte fähig sein, die Zellwand zu durchdringen und ins Innere des Bakteriums zu gelangen. Wenn sich das Schwermetall dort an den Promotor anlagert, aktiviert es die Produktion von Luciferase, die das Bakterium bei Zugabe von Luciferin aufleuchten lässt. Die Intensität dieser Biolumineszenz zeigt die Menge an bioverfügbarem Quecksilber an.

Bei Untersuchungen in Barrow in Alaska ergab diese Analysemethode nach dem polaren Sonnenaufgang und vor Beginn der Schneeschmelze erstaunlich hohe Werte bis zu 25 Nanogramm pro Liter Oberflächenschnee. Die höchsten Gehalte wurden in der Regel einige Wochen nach dem Maximum der Gesamtkonzentration gemessen, die bis zu dreißig Nanogramm pro Liter erreichte. Schneeproben aus einem Seensystem in Kanada, die als Referenz dienten, enthielten dagegen das gesamte Jahr hindurch gleichmäßig nur etwa ein Nanogramm bioverfügbares Quecksilber pro Liter, was rund der Hälfte des Gesamtgehaltes entsprach. Ähnlich niedrige Werte fanden sich im Winter und nach der Schneeschmelze auch in Barrow.

Demnach kann ein bedeutender Teil des Quecksilbers, das sich im Frühjahr in der Polarregion ablagert, Eingang in die Nahrungskette finden. Dieser Teil scheint sich außerdem länger an der Schneeoberfläche zu halten als der nicht bioverfügbare Rest, was möglicherweise auf eine höhere Stabilität gegenüber photochemischen Reaktionen hinweist.

Vom Schnee zurück in die Atmosphäre

Allerdings kann das Quecksilber anscheinend auch wieder aus dem Schnee entweichen. Auf welche Weise dieser Austrag geschieht, lässt sich derzeit noch nicht mit Sicherheit sagen. Am wahrscheinlichsten scheint jedoch zu sein, dass die Quecksilberverbindungen wieder zum Metall reduziert werden, welches dann verdampft. Den Umfang dieser Reemission zu kennen, wäre wichtig, da davon die Nettobilanz des Quecksilbereintrags in das polare Ökosystem im Frühling abhängt.

Aus Gewässeruntersuchungen weiß man schon länger, dass Sonnenlicht die Reduktion von organischen Quecksilberverbindungen zum Metall auslösen kann. Dabei entsteht zugleich gelöster organischer Kohlenstoff, zum Beispiel in Form von Huminsäuren.

Erste Hinweise auf die Ausgasung von elementarem Quecksilber aus dem Schnee fanden Schroeder und Mitarbeiter, indem sie den Konzentrationsverlauf des Elements in der Luft über der Schneeoberfläche maßen: Die Konzentration nahm mit der Höhe ab. Außerdem war sie in den Zwischenräumen der Schneekristalle höher als in der Luftschicht direkt über dem Boden. Schroeder schließt daraus, dass sich in den obersten Zentimetern der Schneeschicht unter dem Einfluss von Sonnenlicht gasförmiges elementares Quecksilber bildet, das bei steigenden Temperaturen im Laufe des Tages in die Atmosphäre entweicht.

Eine Bestätigung dafür lieferten Christophe Ferrari und Mitarbeiter vom Laboratorium für Glaziologie und Geophysik der Umwelt in Grenoble bei Untersuchungen in Grönland und an der Hudson Bay im Frühjahr 2002. Dabei entdeckten sie unter anderem ausgeprägte Tagesgänge der Quecksilberkonzentra- ▷

tionen in den winzigen luftgefüllten Hohlräumen in den oberen Zentimetern der Schneeschicht. Die höchsten Werte traten jeweils in den frühen Nachmittagsstunden auf. Ferrari und seine Mitarbeiter führen dies auf photochemische Reaktionen zurück, die innerhalb weniger Stunden ablaufen können.

Ganz genau wollten es Lindberg und Mitarbeiter wissen: Sie bestimmten unmittelbar an der Eisoberfläche, wie viel Quecksilber der Schnee ausgast. Dazu deckten sie die zu untersuchende Fläche mit einer so genannten Flusskammer aus hochgereinigtem Glas ab und zogen mit genau festgelegter Geschwindigkeit Außenluft hindurch. Indem sie simultan die Quecksilberkonzentration in der Außen- und der Kammerluft maßen, konnten sie aus der Differenz den Emissionsfluss aus dem Untergrund berechnen. Bei unbelasteten Böden liegt er in der Größenordnung von eins bis fünf Nanogramm pro Quadratmeter und Stunde.

Lindbergs Messungen ergaben teils das Hundertfache. Wie sich zeigte, war die Ausgasung bei intensiver Sonneneinstrahlung am stärksten, was die Untersuchungsergebnisse und Schlussfolgerungen von Ferrari und Schroeder bestätigt. Zusammenfassend kommt Lindberg zu dem vorläufigen Schluss, dass bis zu 25 Prozent des im Frühjahr deponierten Quecksilbers wieder aus dem Schnee emittiert werden können.

Einerseits werfen die atmosphärischen Quecksilberrückgänge im polaren Frühjahr also immer noch viele Fragen auf. Andererseits aber bieten sie vielleicht auch den Schlüssel zur Lösung eines verwirrenden Rätsels. Übereinstimmenden Berichten zufolge hat in jüngster Zeit die Belastung höherer Organismen in der Arktis mit Quecksilber zugenommen, obwohl die Emission des Metalls in den vergangenen zwei Jahrzehnten weltweit um etwa dreißig Prozent gesunken ist. Dass in der Arktis entgegen dem globalen Trend mehr von dem Element freigesetzt wird als früher, lässt sich ausschließen. Wie aber kommt es dann, dass sich seine Konzentration in Seevögeln ungefähr verdoppelt hat und auch in Belugawalen und Seehunden deutlich, wenngleich nicht ganz so stark gestiegen ist?

Nicht alles abgelagerte Quecksilber bleibt im polaren Ökosystem. Teils wird es über mehrere Zwischenschritte unter Mitwirkung von Sonnenlicht in das flüssige Metall (Schmelzpunkt: –38,9 Grad Celsius) zurückverwandelt. Dieses ist sehr flüchtig und kann wieder verdampfen. Mit einer dynamischen Flusskammer misst Steven E. Lindberg vom Nationallaboratorium Oak Ridge hier die Ausgasungsrate von Quecksilber während der Schneeschmelze in Nordalaska.

Nebeneffekt der Erderwärmung

Der Widerspruch ließe sich erklären, wenn die atmosphärischen Quecksilberrückgänge ein relativ neues Phänomen wären. Es ist bekannt, dass in der Arktis während der vergangenen dreißig bis vierzig Jahre ein Klimawandel stattgefunden hat (Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 26). So zeigen Beobachtungen, dass die das ganze Jahr über von Eis bedeckte Fläche geschrumpft ist. Ein immer größerer Teil des Meereises bildet sich nur im Winter und schmilzt im Sommer wieder. Außerdem setzt der Schneefall später ein, die Schneeschmelze hingegen früher. Ein wärmerer arktischer Ozean sorgt zugleich für eine stärkere atmosphärische Zirkulation und eine höhere Temperatur der bodennahen Luftschichten.

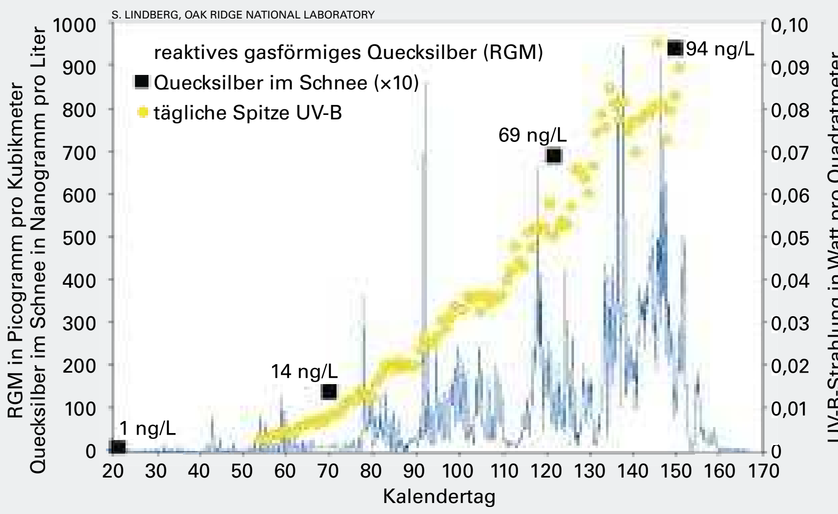
Den Gome-Satellitendaten lässt sich entnehmen, dass erhöhte Konzentrationen an Bromoxid in der Regel nicht über den mehrjährigen Meereisflächen auftreten. Diese sind zu dick und zu wenig lichtdurchlässig, als dass darunter größere Mengen an Algen wachsen könnten, die eine wesentliche Quelle für

Beweis für die Rolle der Sonne

Mit einem so genannten Denuder (links) ermittelten die Autoren an der Neumayer-Station die Konzentration gasförmiger Quecksilberverbindungen, die aus dem Metalldampf bei der Reaktion mit Bromoxid entstehen. Diese und andere Messungen bestätigten, dass in den Polarregionen mit zunehmender Intensität des Sonnenlichts – speziell des energiereichen UV-B-Anteils – Quecksilber aus der Luft im Boden abgelagert wird. Den Zusammenhang hat Lindberg in Nordalaska eindrucksvoll demonstriert (rechts): Parallel zur steigenden UV-B-Einstrahlung nehmen die Episoden, in denen sich gasförmige Quecksilberverbindungen bilden, an Häufigkeit und Intensität zu, während sich die Konzentration an dem Schwermetall im Oberflächenschnee erhöht.



CH. TEMME, GKSS GEESTHACHT




S. LINDBERG, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY

Brom in der unteren polaren Troposphäre bilden. Das weniger mächtige einjährige Eis lässt dagegen mehr Sonnenlicht zu den im Wasser lebenden Organismen vordringen, weshalb die biologische Produktivität hier wesentlich höher ist.

Folglich können sich Bromverbindungen als Abfallprodukt des Algenstoffwechsels unter dem Eis ansammeln und, sobald dieses im Frühjahr aufbricht oder Löcher bekommt, in die Atmosphäre entweichen. Dort reichern sie sich wegen der geringen vertikalen Durchmischung in tiefen Luftschichten an und starten schließlich die Reaktionsketten mit Ozon und gasförmigem elementarem Quecksilber.

Auch andere Beobachtungen deuten darauf hin, dass die atmosphärischen Quecksilberrückgänge erst in neuerer Zeit stattfinden. Seit Beginn der 1970er Jahre nimmt die UV-B-Einstrahlung in der Arktis zu – wahrscheinlich als Folge des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht, die wie ein Schirm kurzwellige Sonnenstrahlung zurückhält. Insgesamt dürfte sich der Ozonverlust in der Arktis seit 1970 auf etwa zwanzig Prozent belaufen. Lindberg und Mitarbeiter konnten nun einen direkten Zusammenhang zwischen UV-B und der Bildung gasförmiger Quecksilberverbindungen nachweisen. Außerdem sollten bei erhöhter UV-Einstrahlung mehr Hydroxylradikale entstehen, die auch die Erzeugung von reaktiven Halogenverbindungen fördern.

All dies zusammen legt nahe, dass die atmosphärischen Quecksilberrückgänge tatsächlich erst vor wenigen Jahrzehnten in größerem Umfang auftraten und sich seither intensiviert und räumlich ausgedehnt haben. Damit könnten sie die Lösung des Rätsels sein, warum bei fallenden globalen Quecksilber-Emissionen die Konzentration des Metalls in der arktischen Tierwelt steigt.

Das beantwortet freilich noch nicht die Frage, ob die Polregionen der Erde eine finale Senke im weltweiten Kreislauf des schädlichen Schwermetalls sind. Atmosphärische Quecksilberrückgänge wurden bislang an fünf Stationen (vier in der Arktis, eine in der Antarktis) beobachtet, die alle in Küstennähe liegen.

Polarregion zu dreißig Prozent verschmutzt?

Für ein umfassendes Bild reichen diese Stichproben nicht aus. Lindberg schlägt daher vor, aus den Bromoxid-Konzentrationsfeldern, die das Gome-Spektrometer liefert, auf die räumliche Ausdehnung der atmosphärischen Queckilbereinträge rückzuschließen. Dann wären nach einer groben Abschätzung etwa dreißig Prozent der Fläche von Arktis und Antarktis betroffen. Da sich die Bromoxid-Wolken auf die Küstenzonen beschränken, sollten Gebiete in Zentralgrönland oder im Hochplateau der Antarktis nicht verschmutzt sein.

Diese Abschätzung ist aber noch mit vielen Unsicherheiten behaftet. Dazu zählt etwa die Frage, wie viel von dem deponierten Quecksilber nach Reduktion zur elementaren Form wieder in die Atmosphäre entweicht. Die von Lindberg ermittelten 25 Prozent erscheinen noch keineswegs gesichert. Auch nicht eindeutig zu beantworten ist derzeit die Frage, wie viel Quecksilber mit dem Schmelzwasser in das Ökosystem gelangt. Zwar lieferten die bisherigen Messungen hohe Konzentrationen bis zu achtzig Nanogramm pro Liter; für weit reichende Schlüsse sind die Daten aber noch zu spärlich.

Die Datenbasis zu verbreitern, war denn auch das Ziel einer groß angelegten internationalen Feldstudie, die im Mai letzten Jahres begonnen hatte. Gleich an mehreren Messstationen auf Spitzbergen arbeiteten bis in dieses Frühjahr hinein Forschergruppen aus Deutschland, Frankreich, Italien, Norwegen, Kanada und den USA, um Reaktionsmechanismen, Ein- und Austragsraten sowie die Konsequenzen der atmosphärischen Quecksilberrückgänge für die polaren Ökosysteme genauer zu ergründen. Die Ergebnisse werden mit Spannung erwartet und sollen auf der nächsten Konferenz zum Thema »Quecksilber als weltweiter Umweltschadstoff« präsentiert werden, die Ende Juni bis Anfang Juli in Ljubljana (Slowenien) stattfindet. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Ralf Ebinghaus hat 1992 an der Universität Hamburg in Chemie promoviert und sich 2003 an der Universität Lüneburg habilitiert. Derzeit leitet er die Abteilung Umweltchemie im Institut für Küstenforschung des GKSS-Forschungszentrums in Geesthacht. **Christian Temme** hat 2003 an der Universität Jena im Bereich Umweltanalytik promoviert. Seither arbeitet er im Institut für Küstenforschung über die Analytik von persistenten organischen Schadstoffen und Quecksilber in der Atmosphäre. **Jürgen W. Einax** ist Professor am Institut für Anorganische und Analytische Chemie der Universität Jena, wo er den Lehrbereich Umweltanalytik leitet. Er hat 1980 an der Universität Halle-Wittenberg in Chemie promoviert.

Measurements of atmospheric mercury species at a coastal site in the antarctic and over the south atlantic ocean during polar summer. Von Ch. Temme et al. in: Environmental Science and Technology, Bd. 37, S. 22 (2003)

Antarctic springtime depletion of atmospheric mercury. Von R. Ebinghaus et al. in: Environmental Science and Technology, Bd. 36, S. 1238 (2002)

Dynamic oxidation of gaseous mercury in the Arctic troposphere at polar sunrise. Von S. E. Lindberg et al. in: Environmental Science & Technology, Bd. 36, S. 1245 (2002)

Magnification of atmospheric mercury deposition to polar regions in springtime: the link to tropospheric ozone depletion chemistry. Von J. Y. Lu et al. in: Geophysical Research Letters, Bd. 28, S. 3219 (2001)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PSYCHOLOGIE

Missverständnisse

Unser Gehirn ist darauf spezialisiert, Ordnung in die wahrgenommenen Dinge zu bringen. Oft irrt es sich dabei – und wir merken nichts davon.

Von Martin Urban

Die große Menge wird mich nie begreifen, die Pfeifen«, weiß der Dichter Robert Gernhardt. Verkannt zu sein ist kein Vorrecht des Genies, nicht verstanden zu werden ist vielmehr ein Normalzustand. Wenn man jemanden ganz genau zu kennen glaubt, dann erstens sich selbst und zweitens den langjährigen Partner. Doch das ist Wunschdenken. Nicht einmal uns selbst können wir verstehen. Die Begründungen, die wir für unser Tun im Nachhinein liefern, sind nicht zuverlässiger als unsere Interpretationen der Handlungsweisen anderer Menschen. Die wahren Gründe entspringen unserem Unbewussten. Das postulierte schon Sigmund Freud. Unsere eigenen Erklärungen für unser Handeln, so Freud, sind lediglich »Rationalisierungen«. Und mit der Dauer einer Beziehung »wächst lediglich die Zuversicht, mit der die Partner glauben, einander zu kennen«, weiß der Psychologe Georg Felser von der Universität Trier. »Missverstehen wir uns richtig« hieß einst ein Kabarettprogramm der Münchner Lach- und Schießgesellschaft.

Tatsächlich bestimmen Unverständnis und Missverständnisse das Zusammenleben der Menschen. Nicht einmal die anscheinend doch völlig eindeutigen Wörter »Ja« und »Nein« verstehen alle Menschen stets gleich. Man weiß zum Beispiel, dass in Beziehungen ein Nein manchmal auch Ja heißen kann und umgekehrt. In manchen Gesellschaften ist es Konvention, dass ein Gast sich mehrmals nötigen lassen muss, ehe er die Frage der Gastgeberin, ob er denn noch etwas zu essen haben wolle, nach mehrmaligem Nein endlich mit Ja beantwortet. In einer Gesellschaft, wo das erste Nein auch Nein bedeutet, verhungert ein Gast mit derartiger Sozialisation leicht. In komplexeren Situationen ist das gegenseitige Nicht-Verstehen eher die Regel und gewiss nicht eine Frage der Intelligenz. Es gibt berühmte, schwer wiegende Missverständnisse wie das zwischen Werner Heisenberg und Niels Bohr. Der deutsche Physiker wollte mitten im Zweiten Weltkrieg seinem dänischen Kollegen vermitteln, dass die deutschen Wissenschaftler die Atombombe nicht bauen wollten, der Däne verstand das Gegenteil und sorgte mit dafür, dass die USA die Bombe bauten. Erst in jüngster Zeit beginnen wir als Ergebnis der Gehirnforschung zu begreifen, was die Kommunikation so schwer macht.

Offensichtlich erinnern wir uns besonders gut an das, was uns überrascht – der bekannte Aha-Effekt. Je stärker das Erlebnis mit Emotionen verbunden ist, desto weniger leicht vergisst man es. Unser Kopf steckt voller Erinnerungen, und was immer dazu kommt, wird im Lichte dieser Erfahrungen gespeichert. Aber im Gegensatz zum Volksglauben nicht etwa jeweils in einer einzelnen »Schublade«, sondern es wird sozusagen unter verschiedenen Stichworten in verschiedenen Hirnarealen archiviert. Jedes Wort, das wir kennen und verwenden, hat für uns eine persönliche, eine familiäre, eine gesellschaftliche, unter Umständen sogar eine zeitgeschichtliche Biografie.

Vieldeutige Bedeutungen

Das Wort DDR zum Beispiel klingt heute anders als vor 1989, obendrein anders für einen SED-Funktionär als für einen Mauerflüchtling, anders für einen Ossi als für einen Wessi. Und selbst ein simpler Versprecher wie der, jemand habe die Universität erfolgreich *observiert* (statt *absolviert*), wird wohl leichter einem Ostdeutschen mit »Vergangenheit« als einem Westdeutschen passieren. Das Gleiche gilt auch für den persönlichen Wortschatz: Mit dem Wort »Hund« assoziiert der eine den Freund der Familie aus Kindertagen, der andere die Bestie, die ihn gebissen hat, der Drit-

te den Kläffer des Nachbarn, der Vierte den Kothaufen, in den er jüngst getreten ist, der Fünfte die Versuchstiere der Pharmaindustrie. Konfrontiert mit dem Wort »Hund« tauchen die damit verknüpften Gedächtnisinhalte aus verschiedenen Orten im Gehirn in ihrer individuellen Tönung auf. Wir speichern Erinnerungen unter verschiedenen Stichworten; das zeigt sich auch daran, dass immer wieder bereits vergessen Geglaubtes unerwartet und in einem uns überraschenden Zusammenhang wachgerufen wird.

Noch vor Jahrzehnten ungeahnte Techniken ermöglichen uns heute die globale Kommunikation. Allerdings: Die *Bedeutung* eines Wortes, eines Satzes, lässt sich nicht mit seiner noch so perfekten Übertragung kommunizieren. Sie lässt sich nur mehr oder minder gut erschließen. Jeder Mensch lebt in seiner eigenen, durch seine individuelle Biografie bestimmten Welt, und die unterscheidet sich von den Welten der Mitmenschen. »Letztlich kann niemand seine private Weltsicht verlassen«, sagt der Bremer Gehirnforscher Gerhard Roth. Sehr selten gelingt es, gewissermaßen exemplarisch eine allgemeine Wahrheit auszudrücken, etwa in einem Gedicht. Doch nur wenige Gedichte bleiben »zeitlos« gültig. Das gilt noch ausgeprägter für die Satire. Wer Aufzeichnungen von Kabarettprogrammen, über die er sich einst halbtot gelacht hat, Jahrzehnte später wieder hört, ist nicht selten sehr enttäuscht.

Jeder Publizist weiß, dass die von ihm geschaffene Logik der Absätze, der Kapitel des Geschriebenen etwas Künstliches haben muss. Wenn er sich ausführlich genug verbreiten kann, hilft er sich damit, zu schreiben, dass er auf einen Gedanken in anderem Zusammenhang zurückkommen werde. Ein Zeitungskommentator kann das nicht, er muss zuspitzen und kann deshalb grundsätzlich auch nur punktuelle Wahrheiten verbreiten – was freilich sehr sinnvoll ist, wenn er sein Geschäft versteht.

Dazu kommt etwas Prinzipielles, das mit der Sprache unvermeidbar verbunden ist: Jeder Satz, den wir formulieren, ist bereits eine Vereinfachung und damit Verfälschung der Wirklichkeit. Denn die Strukturen der Kommunikation werden gewaltsam linearisiert. Wir sprechen in Sätzen, schreiben Zeile für Zeile. Doch die Welt ist nicht linear strukturiert. In unserem Kopf gibt es nur auf hochkomplexe Weise miteinander verschaltete Bilder der Welt. Und in jedem Menschen entstehen andere Bilder. Bestimmte Weisen des Missverstehens sind also systemimmanent. In den Anfangsjahren der Elektrifizierung hat, so



wird erzählt, der deutsche Kaiser Wilhelm II. in Berlin einmal ein Werk der Firma Siemens besucht. Die Werksleitung gab sich viel Mühe, dem Kaiser zu erklären, was Elektrizität mit der Bewegung von Elektronen zu tun hat. Majestät glaubte, alles verstanden zu haben; nur nicht, wie man durch die Stromleitungen so unsichtbar feine Löcher bohren könne, dass die Elektronen durch sie hindurchfließen. Die Herren von Siemens waren amüsiert. Jahrzehnte später haben die Festkörperphysiker das Bild des »Lochs«, das dem Kaiser ganz automatisch gekommen, aber eben falsch war, zur Erklärung dessen, was in »Leitungsbändern« passiert, neu erfunden.

Die Wahrheit des Gegenteils

Wenn heute jemand etwas überhaupt nicht versteht, sagt er wohl: »Ich verstehe immer nur Bahnhof.« Dieses geflügelte Wort hatte am Ende des Ersten Weltkriegs, als es entstand, eine durchaus zu verstehende Bedeutung. Die deutschen Landser hatten damals nichts anderes mehr im Sinn, als zum nächsten Bahnhof und heil nach Hause zu kommen. Und bei allem, was ihnen sonst noch gesagt wurde, wollten sie nur das eine hören: »Bahnhof«.

Überdies ist bei allem, was wir sagen und schreiben, immer auch ein bisschen das Gegenteil wahr, wie bereits die alten Chinesen wussten: Das Yin ist im Yang enthalten und umgekehrt. Ein Ehepaar, schrecklich zerstritten, kommt zum Psychotherapeuten. Dieser lässt zunächst die Frau zu Wort kommen und bemerkt am Ende von deren Klagelied: »Sie haben Recht.« Anschließend trägt der Mann seine Klagen vor und hört zum Schluss vom Therapeuten ebenfalls: »Sie haben Recht.« Die ▷

▷ Anekdote geht dann so weiter, dass das Ehepaar gemeinsam den Therapeuten angreift: »Sie können doch nicht jedem von uns Recht geben!«, worauf dieser antwortet: »Da haben Sie auch wieder Recht.«

Dahinter steckt die Weisheit, dass beide Partner mit ihrer subjektiven Wahrheit Recht haben. Auseinandersetzungen sind deshalb so bitter, weil häufig beide Gegenpositionen richtig sind. Es stimmt eben nicht, dass man die Welt in Gut und Böse einteilen kann, wie es Menschen, die sich selbst für fromm und gut halten, zu allen Zeiten gerne sähen. Niels Bohr hat einmal – so zitiert ihn sein Schüler Werner Heisenberg – formuliert: »Das Gegenteil einer richtigen Behauptung ist eine falsche Behauptung. Aber das Gegenteil einer tiefen Wahrheit kann wieder eine tiefe Wahrheit sein.«

Lediglich auf so hochabstrakter Ebene wie der Mathematik gibt es Eindeutigkeit. Nur die Sprache der Mathematik ist universell, während jeder Dolmetscher weiß, dass es zwischen historisch gewachsenen Sprachen keine Eins-zu-eins-Übersetzung gibt.

Es fällt dem Menschen unheimlich schwer, einzusehen oder gar zuzugeben, dass er rationalisiert. Das ist auch keine Laune der Natur, sondern etwas für die menschliche Existenz Fundamentales. Neuerdings kann man erklären, warum das so ist. »Unser Denkapparat ist gar nicht in der Lage, Unsinniges festzuhalten, und versucht daher, alles Wahrgenommene mit einer Bedeutung zu belegen«, sagt der Bonner Neurophysiologe Detlef B. Linke. Und so interpretieren wir permanent die Welt. Dieses ewige Suchen nach dem Warum, die Kunst der Interpretation von Fakten – selbst wenn man diese nicht genau kennt – ist lebensnotwendig. Wenn die Ahnen des Menschen im Gebüsch zwei Punkte nebeneinander im Lichtschein aufblitzen sahen, interpretierten sie diese als die Augen eines Raubtiers und liefen vorsichtshalber weg, selbst wenn es nur zwei harmlose Lichtpunkte waren. Andernfalls hätten die Menschen nicht überlebt. Indem sich das Gehirn nicht damit begnügt, Ereignisse zu beobachten, sondern sie unentwegt deutet und nach Ursachen fragt, kann es im Wiederholungsfall besser damit fertig werden.

Die Frage nach dem Warum und die Suche nach Antwort ist, aus scheinbar einfachen Zusammenhängen entstanden, die immer wieder auftauchende Grundfrage des menschlichen Lebens geworden. Der eine Teil der Menschheit – der Polizist wie der Publizist – lebt von der Interpretation der Taten und Motive des anderen Teils.

In der Welt geht es freilich nicht nur sinnvoll zu. Dort, wo sich gleichartige Ereignisse häufen, ob beim Lottospiel oder im Straßenverkehr, herrschen die Gesetze der Statistik. Der einzelne Mensch hat keinen Sinn für »Zufall« – im Gegenteil, er sucht ja in allem eine Bedeutung. Das hilft ihm einerseits, versteckte Bezüge zu erkennen. Er ist allerdings andererseits auch anfällig dafür, Zusammenhänge zu sehen, wo es einfach keine gibt, und den blinden Zufall bedeutungsschwer wahrzunehmen. So gibt es nicht wenige Menschen, die Zahlen eine solche Bedeutung zumessen – und ihren Hochzeitstag etwa auf den 20.03.2003 oder den 20.04.2004 legen.

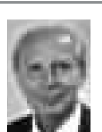
Großartige Zufallstreffer und peinliche Irrtümer

Manche große Entdeckung beruht darauf, dass jemand etwas wahrnimmt, was andere zwar auch sehen, aber nicht gebührend beachten. Der schottische Bakteriologe Alexander Flemming ließ 1928 eine Schale mit einer Bakterienkultur versehentlich im Labor offen stehen. Es bildeten sich darauf Flecken von Schimmelpilzen. Flemming wollte die Schale bereits wegwerfen, da bemerkte er um die Flecken herum eine bakterienfreie Zone. Er vermutete richtig, dass der Schimmelpilz eine Bakterien tötende Substanz absondern müsse – und nannte diese, noch ohne sie näher zu kennen, Penicillin. Das war der Ausgangspunkt einer wissenschaftlichen Revolution, der Entwicklung von Antibiotika.

Man kann sich natürlich auch irren, wie jener bayerische Bub, der einen zweiten Sohn Gottes neben Jesus entdeckt zu haben glaubte. Heißt es doch in dem beliebten Weihnachtslied »Stille Nacht, heilige Nacht, Gottes Sohn, o wie lacht ...« Weil die Bayern einst die so genannte Lautverschiebung nicht mitgemacht haben und deshalb das W leicht mit einem B verwechseln, verstand der Junge: » ... Gottes Sohn, Obi, lacht.« Dabei ist Obi doch nur ein Heimwerkergeschäft ohne jeden transzendentalen Bezug.

Obwohl wir extrem anfällig für Irrtümer und Missverständnisse sind, tut das unserem Selbstvertrauen keinen Abbruch. Wir halten uns gerne für klüger, als wir sind. Und das umso mehr, je weniger Grund wir dazu haben. Denn, wie der US-Psychologe David Dunning vor wenigen Jahren als Ergebnis seiner Untersuchungen feststellte: Die Fähigkeiten, welche Kompetenz ausmachen, sind dieselben, die auch die Grenzen der eigenen Kompetenz erkennen lassen. Das heißt umgekehrt: Wer sich für besonders fähig hält, ist zu dumm, seine eigene Unfähigkeit zu erkennen. Der Philosoph Bertrand Russel klagte: »Das ist der ganze Jammer: Die Dummen sind so sicher und die Gescheiten so voller Zweifel«. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Martin Urban ist Wissenschaftsredakteur und -publizist in Gauting. Von ihm ist soeben das Buch erschienen: Wie der Mensch sich orientiert. Von der Kunst, dem Leben eine Richtung zu geben. Eichborn Verlag, Berlin 2004

Das Einmaleins der Skepsis. Über den richtigen Umgang mit Zahlen und Risiken. Von Gerd Gigerenzer. Berlin Verlag, Berlin 2002

Bin ich so, wie du mich siehst? Die Psychologie der Partnerwahrnehmung. Von Georg Felser. C. H. Beck Verlag, München 1999

Farbenfrohe Antike



Nur unwillig verabschieden sich Archäologen und Kunsthistoriker vom Bild der edlen, in weißem Marmor daherkommenden Antike. Die Wahrheit ist: Sie war knallbunt.

Von Michael Siebler

> Da nun die weiße Farbe diejenige ist, welche die mehresten Lichtstrahlen zurückschicket, folglich sich empfindlicher machet: so wird auch ein schöner Körper desto schöner sein, je weißer er ist.

Kein Geringerer als der Vater der Kunstarchäologie, Johann Joachim Winckelmann (1717–1768), definierte mit diesen Überlegungen gleichsam ein Schönheitsideal, das von der Wiederentdeckung der Antike im Klassizismus bis heute unser Bild des griechischen und römischen Altertums prägt. Dabei störten weder ihn noch andere Gelehrte die pralle Farbenlust ägyptischer Grabkammern und ebenso die zahlreichen antiken Schriftquellen, die beredte Auskunft über die Bedeutung berühmter Maler gaben.

So berichtete Plinius der Ältere (um 23–79 n. Chr.) in seiner »Naturalis historia« über den in der Antike hoch gerühmten Bildhauer Praxiteles (Schaffenszeit etwa zwischen 370 und 320 v. Chr.), er habe auf die Frage, welche seiner Marmorskulpturen ihm selbst am besten gefiele, geantwortet: Diejenigen, »an die Nikias Hand angelegt hat«. War das nicht ein starker Hinweis darauf, dass dieser Maler der zweiten Hälfte des 4. Jahrhunderts v. Chr. nicht nur für seine Gemälde hoch geschätzt wurde, sondern auch für den meisterhaften *circumlitio*, also den allseitigen Anstrich einer Statue?

Welch grundlegende Bedeutung der Farbe für die vollendete Wirkung einer Skulptur zugeschrieben wurde, verdeutlicht auch ein Zitat aus der Tragödie »Helena« des Euripides (um 485–406 v. Chr.). Der Autor lässt seine Heldin ihr unseliges Schicksal beklagen, das sie ihrer Schönheit und dem Täuschungsma-

Mit dem »Blick in Griechenlands Blüte« feierte der Architekt und Maler Karl Friedrich Schinkel 1825 das hehre Ideal der marmorweißen Antike (hier eine Kopie von Wilhelm Ahlborn, 1836).





ALLE DREI: GLYPTOTHEK MÜNCHEN

Der Bogenschütze aus dem Westgiebel des Aphaitempels (linke Seite) trug laut jüngster Rekonstruktion ein saumverziertes Lederwams, bunte Hosen und eine ornamentgeschmückte Skythenmütze. In Blau und Rot ein Versuch Adolf Furtwänglers von 1906, der offenbar diese Farbspuren erkannte.

növer von Hera zu verdanken hat: »Wenn ich doch nur, wieder ausgewischt wie ein Standbild, / anstelle meiner Schönheit eine hässlichere Gestalt annehmen könnte!« Der von Euripides gezogene Vergleich lässt keinen Zweifel zu: Ein farbig gefasstes Standbild (*ágalma*) wird hässlich, wenn es seiner Bemalung wieder beraubt wird, seine Farbe wieder abgewischt ist. Umgekehrt folgt daraus: Erst die Bemalung einer Skulptur erfüllt das Ideal vollkommener Schönheit, für das Helena in der Antike als Inbegriff schlechthin galt.

Barbarisch, primitiv oder einfach etruskisch

Doch den Bewunderern griechischer Kunst im 18. Jahrhundert, dem Zeitalter des Klassizismus, wäre die Vorstellung einer bunten Antike schlicht grotesk erschienen. Manifestierte sich ihrer Meinung nach die als Maßstab geltende Kunst der griechischen Klassik doch gerade in großartigen Werken aus dem reinsten und wertvollsten Material, das dem Bildhauer zur Verfügung stand – dem naturbelassenen Marmor. Schon Michelangelo (1475–1564), Titan der Bildhauerkunst in der Renaissance, hatte seinen David daraus geschaffen, ebenso den Moses und die berühmten Grabdenkmäler in Rom und Florenz. Und wie er, der die Sixtinische Kapelle in einem prächtigen Feuerwerk der Farben ausgemalt hatte, so trennten auch die Klassizisten streng die Malerei von der Skulptur. Diese definierte sich allein über die Form – das Ideal der weißen Marmorstatue war übermächtig.

Zwar konnten auch Winckelmann und seine Zeitgenossen die einschlägigen Schriftquellen zur Farbigkeit von Skulpturen nicht leugnen, aber die »barbarische Sitte des Bemalens von Marmor oder Stein« blieb ihnen zuwider. Sie schrieben diese schlicht einer frühen, primitiven Entwicklungsstufe zu oder betrachteten eine solche Kunstform einfach als etruskische Eigenart – eine aus heutiger Sicht willkürliche Abwertung dieser Kultur. Mitunter half es auch, die Schriftquellen entsprechend der eigenen Anschauung zu deuten, indem man etwa das Wort *ágalma* in der genannten Euripides-Tragödie als »Gemälde« übersetzte. Nicht bedenkend, dass nach dem Abwischen der Farbe von einem Bild nicht eine hässlichere Darstellung übrig bliebe, sondern schlicht gar nichts mehr.

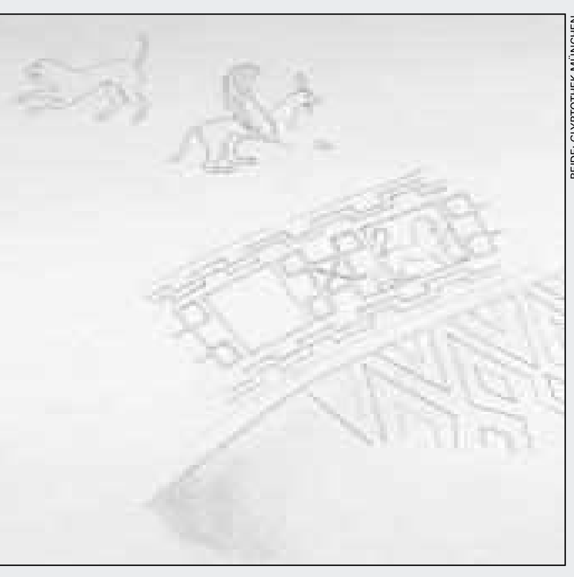
Dieser Blick auf die Vergangenheit überdauerte, obwohl der Erdboden in Griechenland und anderswo bereits seit dem frühen 19. Jahrhundert immer wieder Belege gegen das Ideal des weißen Marmors preisgab. Farbspuren an Giebelskulpturen wie auch an Architekturteilen erkannten und dokumentierten bereits 1811 die Ausgräber des Aphaiatempels auf Ägina – unter ihnen Charles Robert Cockerell (1788–1863) und Freiherr Carl Haller von Hallerstein (1774–1817). Und vier Jahre später publizierte Antoine Chrysostôme Quatremère de Quincy (1755–1849) in seinem Werk über die Goldelfenbeinstatue des Zeus von Olympia, eines der Sieben Weltwunder der Antike, Schriftquellen zur farbigen Plastik. Damit begann eine wissenschaftliche Diskussion über die antike Polychromie, die bis zum Zweiten Weltkrieg andauerte; in dieser Debatte wurde nicht nur vehement über Pro und Contra gestritten. Vielmehr trat noch eine dritte Gruppe auf den Plan, die sich ▷

▷ für einen Mittelweg zwischen den beiden Extremen einsetzte. So proklamierten einige ihrer Vertreter eine Zweifarbigkeit aus Blau und Rot, denn Spuren dieser Farben wiesen Skulpturen bei ihrer Entdeckung häufig noch auf; andere vermuteten Gold und Weiß für die Farbfassung, ein der Rokokoplastik verwandtes Konzept. Zu den frühen Teilnehmern an dieser lebhaft geführten Auseinandersetzung gehörten so berühmte Architekten und Archäologen wie Johann Martin von Wagner (1777–1858), gleichsam Hofarchäologe des Bayernkönigs Ludwig I., der Schöpfer der Dresdner Oper, Gottfried Semper (1803–1879), und der spätere Direktor der Münchner Glyptothek, Adolf Furtwängler (1853–1907).

Kaum verständlich scheint es, dass nach dem Zweiten Weltkrieg das Interesse an der Polychromie nicht nur verebbte, sondern das Thema nahezu in Vergessenheit geriet. Von vereinzelten Fachbeiträgen abgesehen spielte es im wissenschaftlichen Diskurs der Kunsthistoriker und Archäologen kaum noch eine Rolle. Die Ursachen für diesen Abbruch werden heute vor allem in einer Neuorientierung ideologisch-ästhetischer Diskussionen gesehen: Als Folge des Traumas, unter dem Europa nach dem Zweiten Weltkrieg litt, gerieten Vielfarbigkeit und Ornament – zu Anfang des 20. Jahrhunderts noch en vogue – in die Kritik und verschwanden mehr und mehr aus der Lebenswelt. Im Zuge dieser Entwicklung konzentrierte sich vor allem die Nachkriegsgeneration der Archäologen auf eine formalästhetische Betrachtung antiker Kunst. Dabei leugnete sie zwar keineswegs die Existenz einer Polychromie, drängte sie aber an den Rand des wissenschaftlichen Interesses und vermied weit gehend eine konkrete Vorstellung davon. Deshalb ist es wenig verwunderlich, dass unsere Vorstellung vom einstigen Erscheinungsbild griechischer Skulpturen und Bauwerke auch heute noch weithin von den »marmorreinen« Denkmälern geprägt wird, wie sie die Museen der Welt präsentieren.

Erst in den letzten Jahren zeichnet sich ein Umdenken ab und die Polychromie rückt wieder stärker in das Blickfeld der internationalen Forschung. Und das mit gutem Grund, denn die Basis der gesicherten Erkenntnisse über die Verwen-

Archäometrie lässt Buntes wieder leuchten



BEIDE: GLYPTOTHEK MÜNCHEN

Die vielleicht stärkste Methode zur Rekonstruktion antiker Farbgebung bietet ein indirekter Nachweis über das so genannte Farbverwitterungsrelief. Eine Farbschicht schützt den Stein gegen Umwelteinflüsse, doch Ocker hält nicht so gut wie Grün; Blau und Zinnoberrot sind am beständigsten. Kein Wunder also, dass frühere Archäologen allenfalls die beiden letzten nach der Ausgrabung noch sichtbaren Töne in Betracht zogen.

Vinzenz Brinkmann von der Glyptothek in München analysierte das Verwitterungsverhalten anhand von Farben aus Naturpigmenten: Blau aus Azurit, Grün aus Malachit, Rot aus Zinnober, Braun aus dem rötlichen Hämatit sowie aus hellen und dunklen Ockererden. Damit ermittelte er Konstanten für das Verwitterungsrelief. Die wurden dann anhand von mit anderen Methoden nachweisbaren Farbspuren an Skulpturen überprüft, etwa an den Koren auf der Athener Akropolis aus dem »Perserschutt«. Diese und andere Figuren waren in den letzten Jahrzehnten des 6. und zu Beginn des 5. Jahrhunderts v. Chr. geweiht und aufgestellt worden und wurden nach der Zerstörung der Akropolis 480 v. Chr. durch die Perser von den zurückgekehrten Athenern auf dem Burgberg begraben. So waren die Farben nur wenige Jahre der Verwitterung ausgesetzt und sind deshalb noch so gut erhalten.

Um ein solches Relief auch bei vollständig abgedunkeltem Raum zu erkennen, wird die Oberfläche schräg durch eine Schlitzmaske beleuchtet. Dieses Streiflicht vermag auch Ritzungen und Markierungen der Vorzeichnungen deutlich zu machen. Freilich muss jegliche Reflexion des Lichts an hellen Flächen verhindert werden. Für unzugängliche Stellen eignen sich Mikroskopierlampen, deren Licht durch bewegliche Glasfiberlichtleiter geführt wird.

Ein drittes Verfahren, das Verwitterungsrelief sichtbar zu machen, nutzt die Reflexion von ultraviolettem Licht an der Steinoberfläche. Welche Methode das beste Ergebnis liefert, muss von Fall zu Fall entschieden werden. Eines aber ist klar: Keines der Verfahren vermag die vorurteilsfreie Annäherung an das jeweilige Stück zu ersetzen. »Die Bemalungsspur«, so Vinzenz Brinkmann von der Münchner Glyptothek, »erschließt sich nur dem, der mit dem Unerwarteten rechnet.«

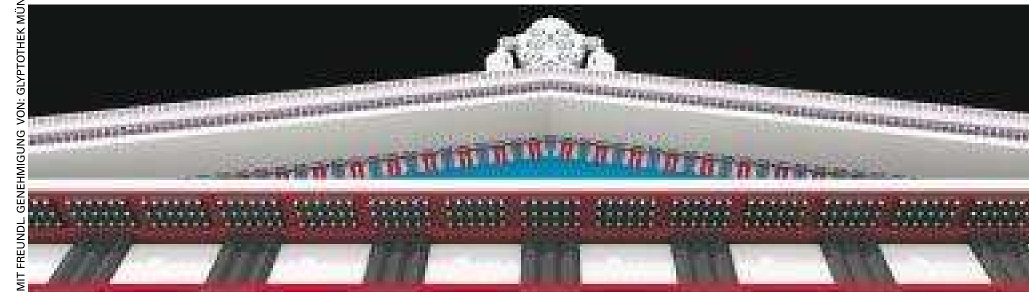
◀ **Wohl nur das geübte Auge erkennt im Streiflicht die Spuren, die das Verwitterungsrelief von Greif, Löwe und Saumband auf der steinernen Jacke des Bogenschützen hinterlassen hat (oben die Umzeichnung).**

Die Entdeckung der Giebelfiguren des Aphaiatempels auf der Insel Ägina im Frühjahr 1811 erregte nicht nur Wissenschaftler, sondern auch Johann Wolfgang von Goethe und Kronprinz Ludwig, später König von Bayern. Die Figuren zeigen Kämpfe zwischen Griechen und Troianern; sie entstanden etwa 490 bis 480 v. Chr. Abgebildet sind (von oben nach unten) die Farbrekonstruktionen von Abel Blouet (1838), Charles Garnier (1884) und Adolf Furtwängler (1906; siehe auch Seite 85); schließlich eine Computerrekonstruktion des Gebälks von 2003.









dung und Anwendung einzelner Farben aus Naturpigmenten hat sich umfassend verbreitert. Zu verdanken ist dies vor allem dem Archäologen Vinzenz Brinkmann von der Glyptothek in München, der seit zwanzig Jahren auf diesem Feld arbeitet. Er suchte unter anderem Ritzungen an Skulpturen in aller Welt, die als Trennlinie das Auftragen der Farben mit dem Pinsel erheblich erleichterten oder erhaltene Farbschichten feinkörniger Pigmente. Der Forscher bestimmte unter dem Mikroskop die ursprünglichen Farbwerte oxidierter oder verschmutzter Farbschichten, entdeckte mittels der UV-Fluoreszenz »unsichtbare« Ornamente und Verzierungen und spürte mit extremem Streiflicht Quadratzentimeter für Quadratzentimeter dem so genannten Verwitterungsrelief nach (siehe nebenstehenden Kasten).

Gewohnte Sichtweisen werden auf den Kopf gestellt

Gemeinsam mit seiner Frau, der Archäologin Ulrike Koch-Brinkmann, rekonstruiert er seit zehn Jahren das farbige Erscheinungsbild ausgewählter griechischer und römischer Denkmäler von der Archaik (etwa 650–490 v. Chr.) bis in die römische Kaiserzeit. Dabei versuchen sie keinesfalls, die einmalige individuelle künstlerische Qualität der Originale wiederzugewinnen – das Ziel ist die bestmögliche Annäherung an die einstige Erscheinung. Unlängst präsentierten die Forscher einige dieser Rekonstruktionen im Rahmen einer Ausstellung der Glyptothek, die nach einer Zwischenstation in Kopenhagen von Juli bis September wieder in München zu sehen sein wird. So mancher dürfte beim Anblick der in Kunstmarmor oder Gips daherkommenden Skulpturen und architektonischen Elemente wohl erschrecken, wird doch die gewohnte Sehweise gleichsam auf den Kopf gestellt.

Die Erhabenheit des marmornen Kunstwerks scheint unversehens einer knallbunten Farbigkeit zu weichen. Gemessen an unserem heutigen westeuropäischen Ästhetikverständnis mag mancher die Nachbildungen geradezu als Kitsch empfinden. Aber eine solche erste Einschätzung darf nicht davon abhalten, sich mit dem Phänomen einer bunten Antike auseinander zu setzen. Denn nur wenn man – im wahrsten Sinn des Wortes – Farbe bekennt, können die bisherigen Erkenntnisse überprüft, Probleme erkannt oder neue Lösungen gefunden werden. Es mag ein kleiner Trost sein, dass Brinkmann selbst erklärt, die vergangenen zwanzig Jahre seien für ihn selbst gerade genug Zeit gewesen, »die Farbigkeit der Skulptur als Kunstform zu akzeptieren«.

Die aussichtsreichsten Kandidaten für seine Rekonstruktionen fand der Archäologe zunächst im eigenen Haus, der Glyptothek: Die Giebelskulpturen vom Aphaiatempel auf Ägina hatte der damalige bayerische Kronprinz Ludwig kurz nach ihrer Auffindung ersteigert. Die ▷

Ausgräber selbst hatten noch erhaltene Farbreste an den Figuren – sie zeigen Szenen aus den mythischen Kriegszügen griechischer Götter und Helden gegen die Troianer – in Aquarellzeichnungen dokumentiert. Adolf Furtwängler unternahm dann in einer 1906 erschienenen Publikation einen Rekonstruktionsversuch, der sich jedoch auf die bis dahin nachgewiesenen blauen und roten Farbreste an Gewändern, Wunden, Waffen oder Schilden beschränkte; für die flächendeckenden Verzierungen orientierte sich Furtwängler an zeitgenössischen Darstellungen auf griechischen Vasen.

Farbe lässt Muskeln spielen

Den Erkenntniszuwachs der letzten Jahre demonstriert eindrucksvoll die Figur des Bogenschützen aus dem Westgiebel; er wird allgemein als Paris bezeichnet, Sohn des troianischen Königs Priamos und Entführer der schönen Helena. Brinkmann konnte nicht nur zeigen, welche Naturpigmente zur Farbfassung der Skulptur verwendet wurden, vielmehr entdeckte er auch nicht aus dem Stein gehauene, sondern nur aufgemalte Verzierungen der Kleidung. Der Abguss aus Kunstmarmor stellt sich als kniender, seinen Bogen haltenden Jüngling dar, der unter einem (Leder-)Wams einen eng anliegenden »Pullover« und eine ähnlich gefertigte Hose trägt. Auf dem Kopf sitzt eine Skythenmütze mit nach hinten hochgebundenen Ohrenklappen, wie sie Vertreter dieses Reitervolkes auf zahlreichen Vasenbildern tragen. Das Farbenfeuerwerk sprüht in Blau und Rot, in Grün und Braun, in dunklem und in hellem Ocker. Am Rand der Weste verläuft ein Saumband, das mit Zinnenmäander (siehe Bild S. 85) und quadratischen Zierfeldern versehen ist, auf denen Löwen dargestellt waren. Kaum zwei Zentimeter große Bilder dieser Raubkatze sowie attackierender Greifen erkannte Brinkmann in Hüfthöhe des Paris; ursprünglich waren sie wohl auf die gesamte Weste verteilt. »Pullover« und Hose waren mit verschiedenartigen, aufwändig konstruierten Rautensystemen überzogen, auch die Mütze war mit Ornamenten verziert. Nächtelange Untersuchungen unter ultraviolettem Licht und unter Streiflicht ermöglichten nicht nur die Entdeckung des Rastersystems, mittels dessen Lage und Größe jeder einzelnen Raute exakt bestimmbar ist, sondern auch eine genaue Rekonstruktion des kunstvollen Rautenmusters, das sogar die durch das Knien, das Beugen und die durch die ausgeprägte Körpermuskulatur hervorgerufenen Dehnungen berücksichtigt. Man staunt immer wieder, wie stark die Farbe die Plastizität der Formen nicht nur unterstützt, sondern geradezu verstärkt.

Der Helm dieses Kriegers aus dem Ostgiebel des Aphaiatempels trug noch Farbspuren der schuppenartigen Zier. Die Bemalung von Nackenschutz und Stirn hingegen sind archäometrisch nicht nachweisbar, sondern von Vasenmalereien und einer weiteren Giebelstatue inspiriert.



ALLE BILDER DIESER DOPPELSEITE: GLYPTOTHEK MÜNCHEN

Mädchenfiguren, so genannte Koren, zierten die Athener Akropolis. Auch die außen stehende Statue wurde diesem Umfeld zugeordnet und auf Grund ihres Gewands als Peploskore bezeichnet. Das Verwitterungsrelief (unten, ein Reiter) aber enthüllt: Es war eine Göttin, vielleicht Athene selbst.



Außer dem bogenschießenden Paris hat Brinkmann auch einen Kriegerkopf aus dem Ostgiebel rekonstruiert. Erst die dafür notwendigen Untersuchungen haben gezeigt, wie die erhaltenen Farbflecken auf der Helmkalotte zu einem sinnvollen Ganzen zu ergänzen sind, welches Ornament sich dahinter verbirgt und dass es Parallelen dazu in der Vasenmalerei jener Zeit gab. Die heute noch sichtbaren Spuren der Helmverzierung bildeten einst ein rotes, aus Schuppen gebildetes Rautennetz, dessen Innenflächen blaue und grüne Felder ausfüllten. In Grün oder Blau – je nach Variante – gehalten waren auch Nackenschutz, Wangenklappen und Stirnpartie, der Rand war rot. Die nicht mehr zu identifizierende Verzierung des Nackenschutzes wurde vom Helm der Athena aus dem Ostgiebel übernommen. Die Palmettenranke auf der Stirn konstruierte Brinkmann nach Vorlagen aus der Vasenmalerei; es gibt dafür keinen archäologischen Nachweis, sie ist aber durchaus denkbar. Gesicht, Augen, Lippen, alles war farbig gefasst, kein einziger Quadratzentimeter blieb naturbelassener Marmor.

Wie wichtig die Arbeit des Malers war, um überhaupt erst den Gesamtein-



▷ druck stimmig erscheinen zu lassen, zeigt einmal mehr die Rekonstruktion einer bekannten Mädchenstatue der Akropolis in Athen. Diese um 520 v. Chr. entstandene Figur wird als Peploskore bezeichnet. Damit schien sie aber nicht in die Gruppe der in Ausdruck und Körperhaltung grazilen archaischen Mädchendarstellungen zu passen, der so genannten Koren. Erst die Kenntnis der einstigen Bemalung ermöglichte die kunsthistorische Einordnung. Denn bei der Analyse des Verwitterungsreliefs kamen in der Gewandmitte zwischen Gürtung und Fußsaum verschiedene Darstellungen zu Tage: ein Reiter, ein Sphinx sowie Steinbock, Löwe und vermutlich ein Eber. Über dem dünnen, feingefälteten *chiton* trug diese Frauengestalt also keinesfalls den ärmellosen und gegürteten *peplos* – von diesem Kleidungsstück hat die Peploskore ihren Namen –, sondern ein prachtvoll mit Tierfriesen verziertes Gewand.

Perspektivisch korrekter Faltenwurf

Ein solcher *ependytes*, der auch von Vasenbildern bestens bekannt ist, stammt aus dem Orient und galt dort als Insignie der Herrscher. Im griechischen Kulturbereich trugen ihn weibliche Hauptgottheiten wie etwa die Aphrodite von Ephesos oder die Hera von Samos – und stets war er mit Tierfriesen verziert. Also war auch die Peploskore mit einiger Sicherheit das Kultbild einer Göttin, möglicherweise die Stadtgöttin Athena mit Lanze und Schild. Denkbar wäre auch Artemis, die Göttin der Jagd, die gleichfalls ein Heiligtum auf der Akropolis besaß und meist Pfeile und einen Bogen als Attribute in der ausgestreckten Hand hält. Wohl nicht ohne Grund erinnern zudem die Bemalung – weißliche, orange-rosa Haut, goldockerfarbenes Gewand – an die berühmten Goldelfenbeinbilder von Gottheiten, wie etwa die Athena Parthenos oder den Zeus von Olympia, beides Werke des zwischen 460 und 430 v. Chr. tätigen Phidias.

Wie strahlend-farbig die in den Heiligtümern und privaten Villen aufgestellten bemalten Statuen oder die in luftiger Höhe versetzten Giebelfiguren auf den Betrachter gewirkt haben müssen, ist heute schwer vorstellbar. Denn nicht nur die einzelnen Denkmäler und Weihegeschenke oder die Figuren in den Tempelgiebeln leuchteten bunt in der Sonne Griechenlands. Auch die meisten Teile der Architektur waren farbig akzentuiert oder vollständig bemalt. Das gilt auch für die Inkunabeln der griechischen Klassik schlechthin, den zwischen 447 und 431 v. Chr. errichteten Parthenon auf der Akropolis. Die Einzigartigkeit dieses marmornen Architekturkunstwerks und das in ihm verwirklichte neue künstlerische Konzept umfasste offenbar auch seine farbige Ausgestaltung.

Hatten die Maler vorangehender Stilepochen Ornamente auf den Gewändern der Skulpturen in klar gegeneinander abgesetzte Farbflächen gegliedert, gaben sie nunmehr einer malerischen Gestaltung der Oberfläche den Vorzug. Das lässt sich am umlaufenden Figurenfries des Parthenons besonders gut zeigen. Um den Faltenwurf bewegter Gewänder perspektivisch korrekt zu imitieren, verwendeten die Künstler dunklere oder hellere Farbwerte, die sie durch Mischung von Naturpigmenten erreichten – bis um 500 v. Chr. waren Farben fast ausschließlich unvermischt eingesetzt worden. Mit dieser Technik und einer kleinteiligen bildhauerischen Gestaltung vermochten die Maler Säume vom Gewand stärker abzusetzen als durch eine einheitliche Farbgebung.

Mit der Einverleibung des griechischen Kulturbereichs in das Imperium Romanum endete der Brauch einer Farbfassung von Statuen und anderen Kunstwerken keineswegs. Vielmehr lassen sich auch bei den Kaiserporträts entsprechende Farbaufträge nachweisen, die ganz in der Tradition der hellenistischen Polychromie standen. Am berühmtesten ist die 1863 entdeckte Statue des »Augustus von Prima Porta«. Bei der von Paolo Liverani von den Vatikanischen Museen verantworteten Farbrekonstruktion des als Feldherr dargestellten Kaisers (63 v. Chr. – 14 n. Chr.) in reich verziertem Metallpanzer und mit Feldherrnmantel dominieren die Farben Rot



NY CARLSBERG GLYPTOTHEK, KOPENHAGEN





BEIDE: GLYPTOTHEK MÜNCHEN

▲ **Spuren von Beinschwarz im Bereich der Schläfenhaare und von rötlichem Krapp am Mund belegen: Das Porträt des römischen Kaisers Caligula war alles andere als edel weiß.**


VATIKANISCHE MUSEEN 2290, NACH PAOLO LIVERANI

Der Vergleich mit der Caligulabüste legt die Vermutung nahe, dass diese Farbrekonstruktion der Augustusstatue von Prima Porta (rechts) wohl noch zu zaghaft ausgefallen ist.

und Blau. Zudem sollen weder der Metallpanzer noch das Inkarnat ursprünglich farblich gefasst, sondern marmorweiß gewesen sein. Dieses Ergebnis weckt aber Befremden, vor allem, wenn man die Augustusstatue mit der Rekonstruktion eines in Kopenhagen aufbewahrten Porträts des wenige Jahre später regierenden Kaisers Caligula (12–41 n. Chr.) vergleicht. Zwar fehlen die Befunde, ob alle malerischen Möglichkeiten, etwa dunklere Schattierungen oder hellere Flächen, ausgeschöpft worden waren. Die Forscher in München und Kopenhagen mussten sich auf nachgewiesene Farbpigmente für Haar, Gesicht und Augen beschränken. Aber das Ergebnis ist sicherlich die beste vertretbare Annäherung an das einstige Original.

Wenn antike Maler »ausrutschen«

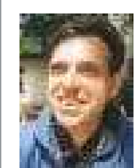
An diesen beiden Werken werden die Grenzen zwischen gesicherter Erkenntnis und Interpretation für die antike Polychromie besonders deutlich. Dies umso mehr, als auf der Innenseite des linken Arms des Augustus ein roter Farbklecks erhalten ist, der als Ausrutscher des Malers interpretiert wird, vielleicht jedoch der Rest einer gemischten Inkarnatfarbe war. Aber an der Tatsache, dass die Königsdisziplin der Bildhauerei, die Freiplastik, im Verständnis der Griechen und Römer erst mit ihrer Farbfassung vollendet und den ästhetischen Ansprüchen entsprechend schön war, daran kann es keinen vernünftigen Zweifel mehr geben. Die »reine« Form und Farbe des Marmors entsprach nicht der antiken Wirklichkeit.

Warum aber bevorzugten Bildhauer dann diesen recht teuren Stein, wenn sie nicht das Ideal der reinen marmornen Form verfolgten? Die Antwort hätte Winckelmann und die Ästheten des Klassizismus wohl vor den Kopf gestoßen: In frischem Zustand ist Marmor weich und lässt sich vortrefflich bearbeiten. Seine kristalline Struktur garantiert eine zuverlässige Qualität und bewahrt Bildhauer vor Überraschungen durch Adern oder Brüche. Mehr noch: Auch diejenigen Künstler, die ihn bemalten, schätzten den Stein, denn seine Oberfläche musste nicht eigens für die Farbfassung vorbereitet werden, und auf der glatten Oberfläche gelangen selbst kleinste Verzierungen mit dem Pinsel. Zudem leuchten die auf Marmor aufgetragenen Farben wie sonst auf keinem anderen Stein. Wohl nicht zuletzt deswegen behandelte man andere Steinsorten vor der Bemalung mit Marmorpulver.

So schließt sich der Kreis zu den antiken Schriften, denen zufolge die Farbgebung der Skulpturen, Reliefs oder Architekturen ebenso künstlerisch anspruchsvoll und in der Antike hoch geachtet war wie die Bildhauerei. Inschriften von der Insel Delos verraten auch, dass diese Arbeit keineswegs weniger kostete. Den Griechen ging es nicht um die Ästhetik des Marmors, sondern um die *mimesis*, wie Brinkmann vermerkt – ein raffiniertes Spiel mit der Wahrnehmung von Wirklichkeit. Die Abbilder der Götter und Heroen in den Heiligtümern »wären ohne die Farbigkeit, die dem Leben entliehen wurde, bedeutungslos gewesen – Museumsstücke eben«.

Man darf gespannt sein, welche Überraschungen die Polychromieforschung noch bereithält. Der Archäologe Georg Treu warnte schon vor hundert Jahren: »Das Abenteuer, so gefährlich es ist, muss einmal gewagt werden, wenn unsere Vorstellungen von antiker Polychromie nicht anschauungsleeres theoretisches Gerede bleiben sollen.« ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Der promovierte Archäologe **Michael Siebler** arbeitet als freier Publizist.

Bunte Götter. Die Farbigkeit antiker Skulptur. Von Vinzenz Brinkmann und Raimund Wünsche (Hg.). Katalog zur Ausstellung. Staatliche Antikensammlung und Glyptothek München, München 2003

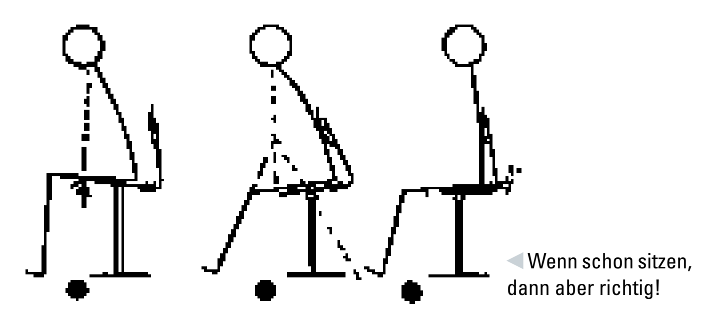
Lexikon historischer Maltechniken. Quellen, Handwerk, Technologie, Alchemie. Von Thomas Brachert, München, Callwey 2001

Color in ancient Greece. Von M.A. Tiverios und D.S. Tsiafakis (Hg.). Proceedings of the Conference held in Thessaloniki 2000, Thessaloniki 2002



Sitzprothese

Die Arbeitsform in Fabrik und Büro hat dazu geführt, daß der Mensch stundenlang an seinem Platz gebunden sitzend tätig ist. ... Hieraus können sich allmählich Schäden am Knochengerüst (Wirbelsäule), Muskelschmerzen sowie Durchblutungsstörungen entwickeln. ... Ursache ist die für die Arbeit im Sitzen unzweckmäßige Stuhlform. ... Die in einförmiger Haltung verharrende Wirbelsäule ermüdet, weil sie ohne Stütze bleibt. ... Messungen haben ergeben, daß die Sitzfläche regelmäßig zu große Tiefe hat. ... Der auf Grund dieser Erfahrungen bei einer Berliner Firma entwickelte Arbeitssitz schaltet die genannten Störungen aus. Er kann der Körperform ... angepaßt werden wie eine »Sitzprothese«. *(Die neue Zeitung, 10. Jg., Nr. 101, S. 18, 1. Mai 1954)*



Wenn schon sitzen, dann aber richtig!

Maikäfer flieg ...

Die Kenntnis der Flugbahnen des Feldmaikäfers Melolontha vulgaris ist sowohl für mechanische als auch chemische Bekämpfungsmaßnahmen von größter Bedeutung. Es war F. Schneider ... möglich, die Flugbahnen und Sammelplätze vorauszubestimmen. ... Da die Orientierung des Käfers rein optisch ist, wurde der zum Fraß kaum geeignete Nadelwald in gleichem Maße angeflogen wie der Laubwald; allerdings sammelten sich die Käfer letzten Endes doch alle im Laubwald ... Nach Reifung der Ovarien erfolgt ein gradliniger Rückflug in offenes Gelände, dem sich an geeigneten Brutplätzen ein spiraliger Ablage-Suchflug anschließt. Nach der Eiablage können erneut ... Fraßplätze aufgesucht werden. *(Die Umschau, 54. Jg., Heft 10, S. 312, 15. Mai 1954)*

Einsteinium entdeckt

Nachdem seit der Entdeckung der letzten Transurane Berkelium und Californium fast vier Jahre verstrichen waren, ist nun von A. Ghiorso und einigen Mitarbeitern in Berkeley (nach unveröffentlichten Mitteilungen übrigens ungefähr gleichzeitig auch im Aragonne-Laboratorium und in Los Alamos) das Transuran 99 entdeckt worden, das bis jetzt noch keinen Namen erhalten hat. Seine Erzeugung gelang durch Anlagerung von Stickstoffkernen, die im Zyklotron hoch beschleunigt worden waren, an Kernen des normalen Urans. Gleich zwei Isotope des neuen Elements wurden gefunden. *(Kosmos, Jg. 50, Heft 5, S. II, Mai 1954)*

Alkohol – die Menge machts

Heute darf wohl als feststehend angesehen werden, daß Alkohol in kleinen Mengen ... absolut unschädlich ist, ja daß er im Gegenteil die Verdauung fördert ... Ob der Alkohol in kleinen Mengen auch noch als Nahrungsmittel dem Körper zugute kommt, oder ob er nur verbrannt wird, ... darüber sind die Meinungen noch geteilt ... Daß aber speziell der Biergenuß auf den Stoffwechsel einen unverkennbaren Einfluß ausübt, das sehen wir an den starken Fettdepots, welche die Süddeutschen sich durch ihren Biergenuß anlegen. *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Jg. 1904, Nr. 111, S. 295, 16. Mai 1904)*

Radiumstrahlung unverändert stark

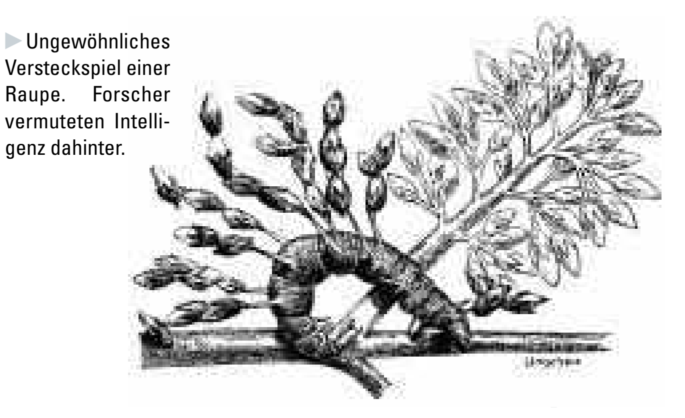
In der Wiener Mineralogischen Gesellschaft sprach Professor Dr. F. J. Becke über das Muttergestein des Radiums, das Uranpecherz. ... Die Fundstellen sind die tiefen Schichten der früheren Silbergänge im Joachimstaler Bergwerke. ... Der Vortragende erwähnte Versuche, die auf Wunsch von Professor Eduard Suess mit den Uranpecherzen aus dem naturhistorischen Hofmuseum unternommen wurden. Diese Erze sind schon seit dem Jahre 1806 im Besitze des Museums. Die Versuche ergaben, dass sie, trotz ihres Alters, von der Intensität der Strahlenwirkung und von der Energie ihrer elektrischen Eigenschaften absolut nichts eingebüsst haben. Sie unterscheiden sich nicht im mindesten von den soeben in Joachimstal gewonnenen Gesteinen. *(Photographische Mitteilungen, 41. Jg., S. 134, 1904)*

Blüten-Maskerade



Der amerikanische Entomologe Shelford beobachtete auf den Blütenständen einer ostindischen Spierstaude (Spiraea) eine Spannerraupe, deren Art vorläufig noch nicht bestimmt werden konnte ... Dieselbe ist dadurch beachtenswert, dass sie die Blütenknospen des Strauches ... in der geschicktesten Weise zur Maskierung benützt. Durch feine Gespinstfäden befestigt sie die abgebissenen Knospen auf den Rückenstacheln ... Unter dem Schutze dieser Knospenhülle ist das Tier inmitten der gewaltigen Blütenbüschel vollkommen verdeckt ... Die bekannte darwinsche Erklärung der Instinkte, durch Selektion der durch den zweckmässigen Instinkt besser geschützten Individuen, scheint hier anwendbar ... obwohl noch »Intelligenz« des Tieres angenommen werden müsste. *(Die Umschau, Jg. VIII, No. 19, S. 376, 7. Mai 1904)*

Ungewöhnliches Versteckspiel einer Raupe. Forscher vermuteten Intelligenz dahinter.

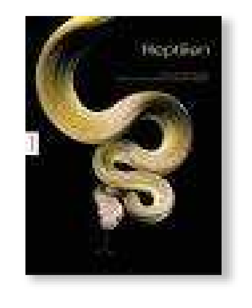


BILDBAND

Paul Starosta (Fotos), Teddy Moncuit und Karim Daoues (Texte)

Reptilien

Aus dem Französischen von Cornelia Sevrain.
Knesebeck, München 2004. 184 Seiten, € 49,90



Der Fotograf legt die Schlange auf einen Tisch, ohne Glas oder eine andere Absperrung zwischen sich und ihr, und bittet sie, sich für die nächste halbe Stunde ganz entspannt und wie zu Hause zu fühlen. Das gelingt nicht allen Models; so müssen gelegentlich mehrere Helfer für eine fotogerechte Haltung sorgen. Dem schmalschnauzigen Flusskrokodil namens Gavial droht vor lauter Stress das Herz zu versagen, und bereits ein Fingernagel kann ihm die empfindsame Haut ritzen. Aber auch dem Fotografen fällt die entspannte Grundhaltung nicht leicht, wenn ihn beidäugig die Rote Speikobra (*Naja pallida*) fixiert, deren Spezialität es ist, mit einem wohlgezielten Giftspritzer die Augen des Opfers außer Gefecht zu setzen.

In der freien Natur sind die Reptilien dieses Bandes allesamt nicht fotografiert; aber der pechschwarze Hintergrund, der alle Details klar und ungestört hervortreten lässt, entschädigt für den Mangel an ökologischer Korrektheit. Ohnehin sind die meisten Schlangen scheu und nachtaktiv und schon deswegen in freier Wildbahn kaum vor die Linse zu bekommen. Paul Starosta, der sich mit dem Bildband »Papillons« (Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 102) als Tierfotograf einen Namen gemacht hat, legt hier ein weiteres Meisterwerk vor.

Ich hätte nie gedacht, dass die in Malaysia und Indonesien lebende Stachelerdschildkröte (*Heosemys spinosa*) Zebrastreifen auf der Bauchplatte hat, oder dass der Schwanz des Sechsstreifigen Schnellläufers (*Takydromus sexlineatus*) fünfmal so lang ist wie der Rest des Körpers. Und fast sieht es so aus, als würde sich das Uganda-Dreihornchamäleon (*Chamaeleo johnstoni*) mit den Stacheln eines Pflanzenstiels den Buch kratzen.

Die Texte vermitteln manchmal einen merkwürdigen Eindruck: Die Tiere sind wundervoll, die Menschen sind böse, denn sie drohen die Tiere auszurotten, aber es gibt gute Menschen, und das sind die Züchter, zum Beispiel die Textautoren. Das klingt platt – selbst wenn es stimmt. Aber es tut der überragenden Qualität der Bilder keinen Abbruch.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

Die Afrikanische Eierschlange (*Dasypeltis scabra*, links) ist kaum mehr als fingerdick, kann aber ein ganzes Hühnerei verschlingen. Die Kragenechse (*Chlamydosaurus kingii*) beeindruckt ihre Gegner durch den ausgebreiteten Kragen sowie ohrenbetäubendes Pfeifen.

PSYCHOPHYSIOLOGIE

Horst-Peter Hesse

Musik und Emotion

Wissenschaftliche Grundlagen des Musik-Erlebens

Springer, Wien 2003. 199 Seiten, € 29,80



Wir alle kennen die unmittelbare Wirkung von Musik: Sie entführt in tiefe innere Welten, beruhigt als Wiegenlied, inspiriert religiöse Handlungen, bringt Gefühle zum Ausdruck, fordert zum Tanz auf, schweißt Gemeinschaften zusammen, setzt uns zum Marsch in Bewegung, versetzt in Ekstase oder hilft bei Trauer und Einsamkeit. Doch warum ist das so, und auf welche Weise werden dabei Herz und Hirn bewegt? Was sagt die Wissenschaft dazu?

Horst-Peter Hesse, Professor für Theorie der Musik an der Universität Mozarteum Salzburg und Leiter des Richter-Herf-Instituts für musikalische Grundlagenforschung, warnt seine Leser bereits im Vorwort, dass er keinen »leicht verdaulichen Brei« servieren möchte, sondern eine »wissenschaftliche« Erklärung dafür, wie unser Nerven- und Hormonsystem auf Musik reagiert. Die Warnung ist nur allzu angebracht: Dieses Buch ist in der Tat schwere Kost.

Im Stil eines Lehrbuches beschreibt Hesse in den ersten fünf von insgesamt acht Kapiteln den physischen und psychischen Wahrnehmungsapparat des Menschen, erörtert Fragen nach dem Bewusstsein, nach dem dualen System von Natur und Kultur sowie nach der Struktur der Persönlichkeit. Seine Überlegungen bezieht er ebenso aus der aktuellen Gehirnforschung wie aus dem Erklärungssystem Sigmund Freuds oder seinem eigenen Schichtenmodell der Persönlichkeit.

Dieser »Vorspann« von über hundert Seiten – von Musik zunächst keine Spur – nimmt mehr als die Hälfte des Buches ein und soll das Hintergrundwissen für die Physiologie und die Psychologie des Musik-Erlebens bereitstellen. Für Leser ohne jegliche Vorkenntnisse mag das in diesem Umfang nützlich sein, wirklich Neues findet sich hier aber kaum.

Außerdem ist diese Einleitung sprachlich so spröde und antiquiert, dass man die Geduld verlieren würde, gäbe es da nicht hin und wieder fesselnde Einschübe zur Wirkung von Musik: weshalb eine bestimmte Musik den Hörer in Trance versetzen kann, warum Popmusik sich so schlecht mit den Maßstäben der klassischen Musik messen lässt oder welche Vorgänge im Gehirn dafür ursächlich sind, dass Kinder, die ein Instrument spielen, neben ihren manuellen auch ihre kognitiven und sozialen Kompetenzen erweitern. Diese Ausflüge in die Musik- und Gefühlswelt lassen auf ein baldiges Ende der Theorie und ein Mehr an Musik hoffen.

Aber auch danach lässt das finale Aha-Erlebnis weiter auf sich warten. Der Autor beginnt eine Fachdiskussion, die höchstens für Berufsmusiker von Interesse ist, etwa über die Wahl von Tempi, über Metronomangaben oder Werktreue. Einige seiner Auffassungen sind dabei durchaus problematisch, etwa ob Musik gemäß den Vorstellungen Sigmund ▷

▷ Freuds tatsächlich ein Ventil für aufgestaute Gefühle ist.

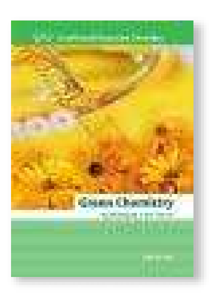
Erst das allerletzte Kapitel widmet sich endlich explizit den Emotionen beim Musik-Erleben. Hier wird knapp und bündig erläutert, welche Art von Musik die unterschiedlichen Persönlichkeitsschichten anspricht, welche körperliche Auswirkung Musik hat oder welche Rolle Ästhetik oder Assoziationen spielen. Davon hätte man gerne mehr erfahren.

So entlässt das Buch den Leser mit gemischten Gefühlen.

Dennoch: Es bietet eine Fülle von Meinungen, Informationen und Ideen zum Musik-Erleben. Die Lektüre vermittelt trotz ihrer Sperrigkeit nachhaltig, weshalb und wie wir »von Natur aus« auf Klänge und Rhythmen reagieren, und das verhilft in der Tat zu einem tieferen Verständnis von Musik. Beim nächsten Konzert werden wir genau wissen, weshalb wir bei einem starken Rhythmus unwillkürlich mit dem Fuß wippen oder warum uns die Sinfonie, die wir gerade hören, in eine andere Welt entrückt.

Eva Kahlmann

Die Rezensentin war Orchestermusikerin und ist heute Redaktionsassistentin bei Spektrum der Wissenschaft.



CHEMIE

Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hg.)

Green Chemistry

Nachhaltigkeit in der Chemie

Amerikanische Beiträge übersetzt von Bernd Ralle.
Wiley-VCH, Weinheim 2003. 142 Seiten, € 19,90

»Chemie stinkt, verschmutzt die Umwelt und ist schädlich für Mensch, Tier und Pflanze.« Oder: »Chemie – das sind Experimente mit bunten Stoffen, wobei spannende Dinge passieren: Explosionen und Ähnliches …«. So weit reichen die Meinungen von Schülern am Anfang ihrer ersten Chemiestunde. Da hat ein guter Unterricht noch allerlei an Bewusstseinsbildung nachzutragen, insbesondere über den Nutzen und die Gefahren der industriell betriebenen Chemie. Das vorliegende Buch, eine Sammlung von zehn Beiträgen verschiedener Autoren zum Jahr der Chemie 2003, will den Lehrenden dabei ein besonderes Anliegen nahe bringen: »Green Chemistry« oder »Nachhaltigkeit in der Chemie« bezeichnet die Bestrebungen, Verfahren zu ändern oder neue zu entwickeln, um eine sichere und saubere Umwelt im 21. Jahrhundert zu gewährleisten.

Das Vorhaben genießt reichlich offiziellen Segen: Die Fachgesellschaften American Chemical Society, Royal Society of Chemistry und Gesellschaft Deutscher Chemiker fungieren als Herausgeber, und Bundesumweltminister Jürgen Trittin gibt ein Geleitwort dazu.

Die Prinzipien der Green Chemistry sind klar und einleuchtend formuliert, zum Beispiel: »Nutzen Sie erneuerbare Ressourcen«, »Vermindern Sie den Energieeintrag«, »Führen Sie nur harmlose Substanzen zurück in die Umwelt«. In den verschiedenen Beiträgen des Buches werden diese Prinzipien beispielhaft konkretisiert.

Sehr gut gelungen ist der Beitrag »Biodiesel aus Rapsöl« von Ingo Eilks und anderen. Vor- und Nachteile des Ersatzes von herkömmlichem Dieselkraftstoff durch Biodiesel werden fundiert gegeneinander abgewogen und diskutiert, chemische Grundlagen kurz erläutert und durch technische Daten ergänzt. Abgerundet wird der Beitrag – wie einige andere Beiträge auch – durch detaillierte Beschreibungen von Schülerexperimenten, die sich mit einfachen Mitteln durchführen lassen (Bild rechts).

Der Beitrag zum »Energieeintrag durch Mikrowelle und Ultraschall« von Arnim Lühken und Hans Joachim Bader zeigt überraschende Möglichkeiten zur Senkung des Energieverbrauchs bei chemischen Reaktionen. Wenn man zum Beispiel die klassische Esterreaktion zur Herstellung des Schmerzmittels Acetylsalicylsäure (»Aspirin«) im Mikrowellengerät statt konventionell im Ölbad ablaufen lässt, sinkt nicht nur der Energieeintrag, sondern auch die Reaktionszeit: von achtzig Minuten auf eine! Auch zu diesem Thema werden Versuchsanleitungen für Schülerpraktika vorgestellt, allerdings mit deutlich größerem materiellem und apparativem Aufwand.

In »Vermeidung von Abfällen durch Atomökonomie« präsentiert Bernd Ralle eine neue Bewertung der Effizienz chemischer Reaktionen. Während in der Regel auch heute noch die reine Produktausbeute, also der Anteil der umgesetzten





Kresse wird auf feuchter Watte ausgesät, in die 0,5 Milliliter Biodiesel (links) beziehungsweise konventioneller Dieselkraftstoff geträufelt wurden. Die Bilder zeigen den Zustand nach 7 Tagen.

Ausgangsstoffe, als Maß für die Effizienz einer chemischen Reaktion herangezogen wird, berücksichtigt die Atomökonomie alle beteiligten Endprodukte, also auch die Abfallstoffe. Effiziente Reaktionen sind demnach also Reaktionen, bei denen möglichst alle Atome der Ausgangsstoffe Teil des gewünschten Reaktionsprodukts sind. Additions- oder Umlagerungsreaktionen sind demnach prinzipiell effizient, da dabei nur ein Produkt entsteht, im Gegensatz zu Substitutions- oder Kondensationsreaktionen, bei denen neben dem gewünschten Produkt immer auch Nebenprodukte entstehen.

Geschickt ausgearbeitete Schülermaterialien, die auch Links zum Arbeiten mit dem Internet mit einbeziehen, wecken das Bewusstsein dafür, dass Abfall nicht verschwindet. Materie kann durch chemische Umsetzungen nicht vernichtet, sondern wie die Energie nur umgewandelt werden. Und da das Leben mit heftiger Durchmischung von Materie einhergeht, befinden sich in jedem Menschen ein paar Atome aus dem Körper eines Dinosauriers und eben auch »Abfallatome« aus irgendeinem chemischen Prozess.

Der Begriff »Atomökonomie« deutet aber schon auf die Schwächen dieses Konzepts hin, denn reines Zählen der Atome, ob gewünscht oder ungewünscht, ergibt noch keine Aussage über die Giftigkeit oder Gefährlichkeit der Produkte oder den benötigten Energieaufwand. »Farbkodierende Wirkfaktoren« sollen das Gefährdungspotenzial chemischer Stoffe oder Prozesse beurteilen helfen. Anstelle einer Erläuterung dieser Methode findet man nur den Hinweis auf entsprechende Internetseiten – schade.

Ein ganzer Artikel ist der »Rückstandsanalytik von Pflanzenschutzmitteln« gewidmet – vielleicht interessant, aber in der Schule kaum verwendbar.

Diesen Einwänden zum Trotz: »Green Chemistry« regt an zum Nachdenken über chemische Experimente und Verfahren – und damit auch über Unterrichtsmethoden. In der gymnasialen Oberstufe soll der lehrerzentrierte Unterricht zunehmend zugunsten eigenständiger Lernformen in den Hintergrund treten; da eignet sich dieses Buch bestens als Materialquelle für projektorientiertes Arbeiten.

Elke Bieler

Die Rezensentin hat Chemie, Mathematik und Politikwissenschaften studiert; sie leitet am Elisabeth-von-Thadden-Gymnasium in Heidelberg die Fachbereiche Chemie und Naturphänomene.



LINGUISTIK

Jürgen Trabant

Mithridates im Paradies

Kleine Geschichte des Sprachdenkens

C. H. Beck, München 2003. 380 Seiten, € 26,90

»Alles, was wir über Sprache wissen, stammt aus den vergangenen dreißig Jahren«, verkündet Derek Bickerton, vor allem als Spezialist für Pidgin- und Kreolsprachen bekannt, in seinem viel zitierten Buch »Language and Species« aus dem Jahr 1990. Soll heißen: Erst mit »Syntactic structures« von Noam Chomsky begann die Sprachwissenschaft als Wissenschaft im eigentlichen Sinne. Ihr Gegenstand ist nicht mehr die Kunde von den verschiedenen menschlichen Sprachen und den diversen Fassetten menschlichen Sprechens, sondern ▷

PREISRÄTSEL

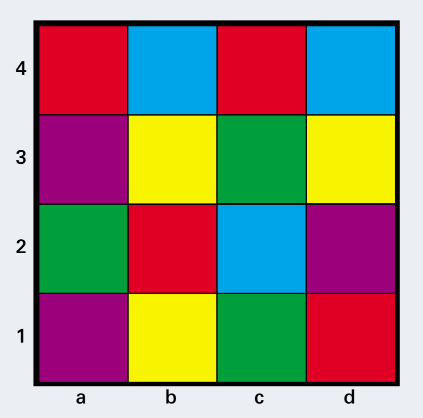
Buntes Durcheinander

mitgeteilt von Herbert Burmeister

Auf dem Spielbrett herrscht buntes Durcheinander: Nirgends grenzen zwei gleichfarbige Felder waagerecht, senkrecht oder diagonal aneinander (Bild rechts). Außerdem gibt es 16 quadratische Fliesen, jede so groß wie ein Feld, und zwar je drei rote, blaue, grüne und lilafarbene sowie vier gelbe.

Bedecken Sie nun nacheinander alle Felder mit je einer Fliese, und zwar so, dass zu jedem Zeitpunkt buntes Durcheinander herrscht, dass also niemals auf zwei benachbarten Feldern die gleiche Farbe zu sehen ist.

Notieren Sie die Reihenfolge, in der Sie die Fliesen aufs Spielbrett legen.



Schicken Sie Ihre Lösung bitte in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Kreisel »Gyrotwister«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. Mai 2004, eingehen.

Lösung zu »Jans Kalkuhlation« (März 2004)

Jans Weide muss einen Flächeninhalt von 128 Ar haben, damit 100 Kühe 16 Tage lang auf ihr grasen können.

Astrid Franz aus Hamburg führte zur Lösung des Problems zuerst eine neue Masseneinheit namens KTR (Kuhtagesration) ein. Eine KTR ist die Grasmenge, die eine Kuh pro Tag frisst. Das Problem lässt sich nun mit folgenden Unbekannten beschreiben:

- g sei die anfängliche Grasdichte, das heißt die Grasmenge pro Flächeneinheit, gemessen in KTR pro Ar.
- n sei die Zuwachsrate, das heißt die nachwachsende Grasmenge pro Zeit- und Flächeneinheit, gemessen in KTR pro Ar und Tag.
- A sei der Flächeninhalt der gesuchten Weide.

Für die Kühe verfügbar ist die Summe aus ursprünglicher und nachwachsender Grasmenge, das ist gleich der anfänglichen Grasdichte mal der Fläche plus der Zuwachsrate mal der Fläche mal der Anzahl der Tage. Diese Menge muss gleich dem sein, was die Kühe in der angegebenen Zeit fressen, also gleich Anzahl der Kühe mal Anzahl der Tage (in KTR).

Aus den Angaben der Aufgabe folgt das lineare Gleichungssystem (Einheitenbezeichnungen weggelassen):

$$20\,g + 20 \cdot 4\,n = 100$$
$$24\,g + 24 \cdot 5\,n = 135$$
$$A\,g + A \cdot 16\,n = 1600$$

Lösung: $g = 5/2$ KTR pro Ar; $n = 5/8$ KTR pro Tag und Ar; $A = 128$ Ar.

Wie groß müsste aber die Weide bei nachhaltiger Wirtschaftsweise sein, sodass Jan seine Kühe unbegrenzt auf der Weide lassen könnte? Eine Fläche von 8/5 Ar ernährt eine Kuh, denn auf ihr wächst so viel nach, wie die Kuh frisst: eine KTR pro Tag. Für 100 Kühe sind also 160 Ar bereits genug.

Die Gewinner der fünf Spiele »Braintwister« sind Reinhard Göller, Karlsruhe; Eberhard Leutheußer, Moosburg; Andreas Lorbach, Eschborn; Yvonne Ilk, Köln; und Franz Pichler, Wien.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ menschliche Sprache schlechthin. Es geht um anthropologische Universalität, nicht um historische Variabilität. Ihre nächsten Verbündeten findet sie dementsprechend nicht mehr in den einzelsprachlichen Philologien oder den Geschichts- und Sozialwissenschaften, sondern in der Kognitionspsychologie, der Neurologie oder auch der Evolutionsbiologie.

Jürgen Trabant tritt mit seinem Buch an, diese Geschichte als Erfolgsgeschichte zu demontieren. »Nichts als alter Wein in neuen Schläuchen!«, ruft der Berliner Professor für romanische Sprachwissenschaft und erzählt eine gar nicht so kleine Geschichte des Nachdenkens über die Sprache buchstäblich von Adam und Eva und dem Turmbau zu Babel bis ins 20. nachchristliche Jahrhundert. Das Paradies steht bei Trabant als Chiffre für universalistisches Sprachdenken, das an der Vielfalt der Sprachen auf der Welt Anstoß nimmt und die Sprache selbst als Hemmschuh auf dem Weg zur reinen Erkenntnis verdächtigt. Mithridates hingegen ist jener Potentat vom Schwarzen Meer und Erzfeind der Römer, der nach Aussage etlicher antiker Quellen mindestens zwanzig Sprachen perfekt beherrschte; »Mithridates« war aber auch der Titel zweier Sprachenzyklopädien. So gerät ein persischer Name zum Markenzeichen von Sprachtheorien, welche die Diversität und Historizität der Sprachen als Reichtum begreifen und ihre kommunikative Leistung in den Vordergrund der Überlegungen stellen. (Letzteres ist nicht so selbstverständlich, wie es den Anschein hat: Bickerton und Chomsky sehen Sprache gerade nicht in erster Linie als Mittel zur Kommunikation an.)

Vielheit gegen Einheit, Kommunikation gegen Kognition: Das sind die Pole, zwischen denen sich das Nachdenken über Sprache abspielt. Den Verlauf dieses Nachdenkens zeichnet Trabant nach: Geistesgrößen wie Platon und Aristoteles, Dante Alighieri und Martin Luther, Herder und Humboldt, Wittgenstein und Heidegger und natürlich auch Chomsky kommen ausführlich (zuweilen sehr ausführlich) zu Wort. Die Reise führt vom Garten Eden über Athen und Rom, Florenz, London und Paris bis in den Schwarzwald und nach Massachusetts. Vor den Augen des Lesers entfaltet sich ein buntes Panorama nicht nur des Sprachdenkens, sondern auch der Sprach-, Literatur- und Geistesgeschichte

(hauptsächlich) Westeuropas. Insofern ist der Untertitel »Geschichte des Sprachdenkens« ein grandioses Understatement.

Er ist aber auch irreführend; denn was hier scheinbar harmlos als kulturgeschichtliche Abhandlung daherkommt, ist zugleich ein Plädoyer für sprachliche Vielfalt. Es ist, so Trabant, eben nicht gleichgültig, welcher Sprache wir uns bedienen; jede Sprache verkörpert einen eigenen Zugriff auf die Welt und ist schon darum erhaltungs- oder doch wenigstens erforschungswürdig. Natürlich lauert hinter diesem Standpunkt die Falle des kulturellen Relativismus, weshalb Trabant sich gleich in der Einleitung durchaus für universelle Werte stark macht: »Eine Kritik der Kulturen im Namen universeller Werte halte ich für völlig legitim und notwendig.« Sprachen aber seien, anders als etwa die kulturell bedingte Deklassierung von Frauen in vielen Ländern, »unschuldig different«. Mit jeder Sprache könne man »alles sagen, nur jede tut es anders«.

Anschwimmen gegen den Strom

Die Kehrseite dieser – zumal im Angesicht eines weltweit galoppierenden Sprachensterbens – sympathischen Sichtweise ist eine bisweilen reichlich plakativ vorgetragene Kritik an der »Globanglisierung«, einem »Götzen des Marktes«: »Dass es nur noch eine Sprache auf der Welt geben soll, ist vielleicht das kommunikative Paradies, es ist aber die kognitive Hölle, ein Triumph der Dummheit« – das ist gewiss schmissig formuliert, aber noch befinden wir uns nicht einmal im Fegefeuer. Noam Chomsky und »sein Vertreter auf Erden«, der Harvard-Psychologe Steven Pinker – dessen Buch »Der Sprachinstinkt« ein populärer Klassiker geworden ist – sind Trabants seltener genannte als gemeinte Hauptangriffsziele: Als Galionsfiguren einer universalistischen Sprachwissenschaft und als Amerikaner stehen sie für den Mainstream, gegen den Trabant sich anstemmt. »Differences are so boring«: Dieses in der Tat ausgesprochen unglückliche Diktum Pinkers reibt Trabant dem Leser gleich mehrfach unter die Nase.

Spätestens dort, wo er die Desintegration von Sprach- und Literaturwissenschaft beklagt, wandelt sich Trabants Werk zu einer grundsätzlichen und wichtigen Stellungnahme wider den ahistorischen Universalismus in Sprach- wie Literaturwissenschaft und für die gute ▷

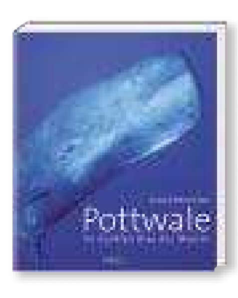
▷ alte Philologie, die »Liebe zum Wort«. Zurück zu den Sprachen, zurück zu den Texten! lautet sein Schlachtruf, und es ist ihm ernst. Das erklärt eine gewisse Einseitigkeit der Berichterstattung, einen Hang zu süffisant-polemischen (aber stets treffenden) Formulierungen – und eine erhebliche Weitschweifigkeit. Wer das Hohelied der Sprache singt, ist schwerlich bereit, einen sorgsam ziselierten Satz zu streichen, nur weil er inhaltlich nichts wesentlich Neues bietet.

Da Trabant es eindeutig eher mit dem polyglotten Herrscher vom Schwarzen Meer hält als mit dem einsprachigen Paradies, darf man sich auch nicht darüber verwundern, dass zentrale Begriffe auch in ihrer jeweiligen Originalsprache, und sei es Altgriechisch oder Italienisch, angeführt werden: Wenn Sprachen wirklich »verschiedene Weisen, die Welt zu sehen« sind, bleibt bei einer Übersetzung immer etwas, und manchmal vielleicht sogar Entscheidendes, auf der Strecke. Heutzutage gilt diese Aussage leider nicht mehr als selbstverständlich.

Jürgen Trabants brillant geschriebene »Kleine Geschichte des Sprachdenkens« schärft den Blick für die historische Dimension der Sprachen und auch der Sprachwissenschaft und schafft so ein willkommenes Gegengewicht zum momentan tonangebenden universalistischen Paradigma. Ich wünsche Mithridates ein dauerhaftes Wohnrecht im Paradies – und Trabants Buch viele Leser.

Vera Binder

Die Rezensentin hat Vergleichende Sprachwissenschaft und Klassische Philologie in Tübingen studiert und ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Gießener Sonderforschungsbereich »Erinnerungskulturen«.



BILDBAND

Andrea und Wilfried Steffen

Pottwale

Im dunklen Blau des Meeres

Heel, Königswinter 2003. 160 Seiten, € 19,95

Andrea und Wilfried Steffen haben ein besonderes Hobby: Pottwale beobachten. Während vieler Jahre näherten sich die beiden Sporttaucher den großen Meeressäugern immer mehr. In ihrem Buch haben sie ihre Erlebnisse, Beobachtungen und Geschichten zusammengetragen und mit zahlreichen ungewöhnlich schönen Fotografien und Zeichnungen illustriert.

Herausgekommen ist kein nüchternes Sachbuch, sondern ein buntes Album mit persönlichem Charakter. Es besticht weder durch wissenschaftliche Vollständigkeit noch durch professionelle Distanz, sondern durch das liebevolle Nebeneinander eigener Beobachtungen und Interpretationen, ergänzt durch interessante wissenschaftliche Fakten und einen gut geschriebenen historischen Überblick über den Mythos Pottwal. Das Buch vermittelt die von Neugier und manchmal auch Poesie geprägte Auseinandersetzung zweier Menschen mit den großen Meeressäugern. In den einzelnen Kapiteln reißen Andrea und Wilfried Steffen viele Fassetten eines Pottwal-Lebens an, wie etwa die komplizierte Physiologie, die es den Tieren erlaubt, in größten Tiefen nach Beute zu suchen, oder ihr noch weit gehend unerforschtes Paarungsverhalten in Vollmondnächten.

Bei den wunderbaren Fotografien wiederholen sich viele ähnliche Perspektiven, und den Texten fehlt im ersten Teil des Buches manchmal die Struktur. Beides verzeiht man jedoch den Autoren, weil sich ihre Liebe zu den Pottwalen auf jeder Seite niederschlägt und ihre Faszination auf den Leser überspringt.

Antje Kahlheber

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz. ◁

Zum beschleunigten Abtauchen in große Tiefen nimmt der Pottwal seine Schwanzflosse (Fluke) zu Hilfe.

Strategien der besten Wahl

Wer anspruchsvoll ist, will immer nur das Beste. Aber wehe dem, der das Beste verschmäht, weil er auf Besseres hofft – und es kommt nichts Besseres!

Von F. Thomas Bruss

Vielleicht sind Sie mit dem Kauf Ihres Autos sehr froh. Kurz danach kommt ein neues auf den Markt, das Ihnen noch besser gefällt, und Sie ärgern sich. Bei der nächsten Gelegenheit zögern Sie, weil man ja nicht weiß, ob es in Zukunft ein noch besseres Angebot geben wird – und ärgern sich, weil Sie eine einmalige Gelegenheit haben verstreichen lassen. Gibt es eine Entscheidungsstrategie für Anspruchsvolle, die immer nur das Beste wollen?

Ein Zettelspiel als Einführung

Ihre Frau legt ein Päckchen mit zehn Zetteln auf den Tisch und erklärt: »Ich habe auf die Rückseiten dieser Zettel verschiedene Zahlen geschrieben und sage dir nichts über diese Zahlen. Jede nur denkbare Zahl und Reihenfolge ist möglich. Du darfst mischen, ohne auf die Zahlen zu schauen.« – Sie tun es. – »Nun darfst du eine Zahl nach der andern aufdecken und genau eine wählen – und zwar sofort nach dem Aufdecken; später gilt nicht. Danach decken wir alle Zahlen auf und vergleichen. Wenn du die größte Zahl gewählt hast, gewinnst du, sonst verlierst du.«

»Verliere ich bei der zweitgrößten?«

»Ja, nur die größte gewinnt, und wenn du keine wählst, verlierst du auch.«

Dass Ihre Frau anspruchsvoll ist, wissen Sie schon längst. Sie akzeptiert eben nur das Beste. Aber was sollen Sie tun?

Sie drehen den ersten Zettel um: 2,53. (Komische Zahl!) Dennoch, vielleicht sind alle anderen Zahlen kleiner. Wenn Sie diese wählen, ist Ihre Erfolgswahrscheinlichkeit 1/10, da Sie gemischt haben und damit alles gleich wahrscheinlich ist. Wenn die nächste Zahl größer ist, dann wird 2,53 uninteressant, ansonsten bleibt sie ein möglicher Gewinner. Eins ist klar: Wenn Sie weiter machen, haben Sie nur bei den Zahlen ein Entscheidungsproblem, die größer als alle vorherigen sind; mit einer kleineren können Sie nicht gewinnen. Ja! Eigentlich brauchen Sie sich nur die letzte bisher größte Zahl zu merken! Aber je mehr Zahlen Sie aufdecken, um so größer wird die Wahrscheinlichkeit, dass Sie die größte schon übergangen haben.

Ihre Frau lächelt Sie an. – Sie bitten um Bedenkzeit.

Wie wäre es mit folgender Strategie: Sie decken die ersten (sagen wir) fünf Zettel auf, merken sich die größte dieser Zahlen und wählen dann die nächste größere Zahl, wenn es eine gibt? Diese Strategie führt zumindest dann zum Erfolg, wenn die zweitgrößte aller Zahlen auf einem der ersten fünf Zettel und die größte auf einem der übrigen fünf Zettel steht. Denn die Wahrscheinlichkeit allein dafür ist bereits $(5 \cdot 5)/(10 \cdot 9) = 25/90$, eine erhebliche Verbesserung im Vergleich zu 1/10.

Die optimale Strategie hat tatsächlich diese Form: Man schaut eine gewisse Anzahl s von Zahlen an und wählt danach, wenn möglich, die nächste, die größer als die ersten s Zahlen ist. Der Beweis, dass die optimale Strategie diese Form hat, ist etwas anspruchsvoller. Die optimale Anzahl s hängt von der Gesamtanzahl n der Zettel ab und kann genau berechnet werden, ebenso die entsprechende Gewinnwahrscheinlichkeit. Das genaue Resultat ist kompliziert, aber es gibt eine einfache Faustregel:

- Die Gesamtanzahl der Angebote (Zettel) mit 0,367 multiplizieren und abrunden. Das Ergebnis ist eine gute Näherung an den optimalen Wert von s.
- Nach Beobachtung der ersten s Angebote das nächste Angebot wählen, das besser ist als das bisher beste. Wenn keins mehr kommt, hat man verloren.

Ihre Frau wartet und lächelt wieder. Ihre Kopfrechnung lautet $10 \cdot 0{,}367 = 3{,}67$; abgerundet ergibt dies 3. Also $s = 3$. Los geht's.

Sie lächeln zurück und drehen den zweiten Zettel um: –3,1415. (Frechheit, aber uninteressant.) Nun den dritten: 1000. (Aha!) Nicht beirren lassen; die Faustregel sagt »nach $s = 3$«. Von nun ab aber ist es optimal, bei der nächsten Gelegenheit zu wählen. Ihre Gewinnwahrscheinlichkeit ist rund 40 Prozent, genauer gesagt $3 \cdot (1/9 + 1/8 + \ldots + 1/3)/10 = 0{,}3987\ldots$. Ihr Risiko zu verlieren ist somit hoch. Aber dies liegt in der Natur des anspruchsvollen Ziels! Kein Analyst, kein Berater, niemand kann daran etwas ändern. Die Hypothesen stimmen, und die Mathematik ist auf Ihrer Seite. Ein bisschen Glück gehört immer dazu.

Wenn Sie gewinnen, belohnt Sie Ihre Frau am Sonntag mit Lammkoteletts, Pariser Böhnchen, einem guten Bordeaux und zum Dessert Omelette Norvégienne. Wenn nicht, stehen Sie selbst in der Küche, und Ihre Kochkünste – na ja. Also: Viel Glück!







STEFAN DINTER

Eine optimale Strategie hat etwas Bestechendes. Wer sie kennt, schlägt jeden, der sie nicht kennt – nicht jedesmal, aber »in Erwartung«, das heißt auf lange Sicht. Kaum jemand kennt sie, denn eine optimale Strategie zu finden ist nicht einfach, insbesondere im täglichen Leben. Aber die Idee, sich an optimalen Strategien für idealisierte, einfachere Situationen zu orientieren, sollte man in ihrer Wirksamkeit nicht unterschätzen.

Kann man die optimale Strategie für das Zettelspiel auf den Kauf oder Verkauf von Aktien, Immobilien oder Kunstgegenständen übertragen? Kann man sie benutzen, um den besten Kandidaten für eine gewisse Stelle oder sogar für den besten Ehepartner zu finden?

In der Literatur wird die Frage meistens als das »Sekretärinnenproblem« bezeichnet. *n* Anwärterinnen sprechen nacheinander für die Stelle einer Sekretärin vor, und der Chef kann jeder von ihnen auf der Stelle zusagen – oder auch nicht, in welchem Falle sie auf Nimmerwiedersehen verschwindet. Es gibt keine Rückrufmöglichkeit. Der Chef will nur die Beste! Mit der Zweitbesten ist er nicht zufriedener als mit der Unfähigsten.

Statt der Sekretärinnen stellt man sich auch gerne potenzielle Ehemänner vor. Die anspruchsvolle Frau – sagen wir die Prinzessin – kann sie zwar alle durchprobieren, aber nur einen nach dem anderen, und wen sie einmal weggeschickt hat, der kommt nicht wieder.

Ist die optimale Strategie auf solche Situationen übertragbar? Im Prinzip ja. Es ist jedoch Vorsicht geboten. Die Hypothesen, die der Strategie zu Grunde liegen, müssen ebenfalls übertragbar sein.

Es ist zum Beispiel durchaus vernünftig anzunehmen, dass ein Hausverkauf ungefähr so abläuft wie ein Zettelspiel: Die Angebote der potenziellen Käufer sind – innerhalb einer gewissen Bandbreite – unabhängig voneinander, und das eine Angebot sagt Ihnen so gut wie nichts über die Angebote, die noch kommen könnten. Anders beim Aktienkauf: Der Kurs von morgen ist keineswegs unabhängig von dem Kurs von heute. Und ob die Prinzessin wirklich nicht die geringste Vorstellung hat, ob da draußen nur noch Frösche oder auch Traumprinzen warten?

Im Wesentlichen wären viele Kauf- und Verkaufsprobleme, ja sogar Kandidaten- und Heiratsprobleme genauso zu lösen wie das genannte Zettelspiel, wenn … die Anzahl der Zettel im Voraus bekannt wäre. Im Allgemeinen weiß man aber nicht, wie viele potenzielle Käufer oder Traumprinzen vorsprechen werden.

Glücklicherweise kann das Modell durch einen Trick angepasst werden – und zwar erstaunlicherweise, ohne dass darunter die Erfolgswahrscheinlichkeit sehr leidet. Die Unkenntnis über die Anzahl beeinträchtigt uns also überraschend wenig: ein gutes Beispiel für die Überlegenheit mathematischer Modellierung über menschliche Intuition. Als ich das 1984 bewies, wurde dieses Resultat in einem Referat in den »Mathematical Reviews« als »Wunder« bezeichnet.

Das Modell selbst ist nicht schwierig und dürfte jeden Strategen interessieren. Hier ist es.

Das 1/*e*-Gesetz der besten Wahl

Nehmen wir an, Sie wollen in den nächsten sechs Monaten Ihr Haus verkaufen. Interessenten kommen, angelockt durch Anzeigen oder Immobilienmakler, geben ein Angebot ab und wollen auf der Stelle Ihre Antwort haben. Was sollten Sie tun?

Papier und Bleistift zur Hand, und nun einige kleine Fragen an Sie selbst: Was kann die Ankunftszeiten der möglichen Angebote beeinflussen? Für die nächsten drei Monate haben Sie für jeden ersten Samstag im Monat eine Anzeige in der Lokalzeitung aufgegeben. An diesen Samstagen oder kurz danach wird es mehr Anrufe geben als sonst. Mit der Zeit geht dieser Effekt zurück, weil diejenigen, die Ihre Anzeige schon kennen. nicht mehr anrufen. Zeichnen Sie Ihr Zeitintervall und wagen Sie sich an eine Kurve, welche die vermutete Wahrscheinlichkeit der Ankunftszeiten möglicher Angebote wiedergibt.

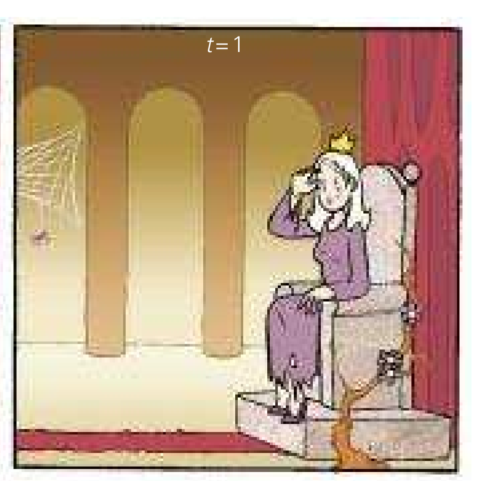
In sechs Wochen verreisen Sie und kommen erst zwei Wochen später wieder. Folglich in der entsprechenden Zeit die Kurve niedrig anlegen und nach der Rückkehr wieder ansteigen lassen. Wissen Sie sonst noch etwas? Halten Sie nur das Wesentliche in dieser Kurve fest, Details sind kaum wichtig.

Schauen Sie sich nun die Fläche zwischen Ihrer Kurve und Ihrem Zeitintervall an und schätzen Sie mit dem bloßen Auge oder mit einer Rasterfolie die ersten 36 Prozent der Fläche ab. (Die 36 Prozent sind eine Annäherung für $1/e$, dabei ist e die nach Euler benannte Zahl 2,718282…, die Basis der natürlichen Logarithmen.) Ein senkrechter Strich an dieser Stelle bestimmt einen Zeitpunkt x auf Ihrem Zeitintervall. Das ist Ihr Stichtag! Die Strategie lautet: Warten Sie bis zum Tag x und merken Sie sich das bisher beste Angebot. Und verkaufen Sie dem ersten Interessenten, der nach dem Tag x mehr bietet!

Wenn Sie dies tun, dann handeln Sie optimal, denn unter der Hypothese, dass man auf vorherige Angebote nicht zurückkommen kann, gibt es keine bessere Strategie! Wenn es Angebote gibt, haben Sie eine Erfolgswahrscheinlichkeit von mindestens $1/e$. Hier spielt dieser Wert ▷







Vom Traumprinzen zum 1/*e*-Gesetz

Ein Prinz nach dem anderen hält um die Hand der schönen Königstochter an. Die weiß schon, welchen unter allen, die sie bisher gesehen hat, sie bevorzugen würde. Aber sie muss sich jetzt entscheiden, ohne zu wissen, was noch kommt. Nur dem Besten will sie das Jawort geben. Wie soll sie das anstellen?

Nehmen wir an, die Anzahl der Kandidaten n sei bekannt. Die allgemeine Strategie ist, zunächst in einer »Erkundungsphase« s Kandidaten zu besichtigen und keinen von ihnen zu akzeptieren, aber dann den nächsten Besten zu nehmen, sprich den ersten, der besser ist als alle bisher besichtigten.

Nennen wir den besten aller Kandidaten überhaupt (den »Traumprinzen«) Charles. Unter welchen Umständen wird er erwählt? Erstens darf er nicht zu früh kommen, denn wenn er unter den ersten s ist, wird er automatisch verschmäht. Sagen wir, er kommt an j-ter Stelle, mit $j > s$. Zweitens kommt dann alles auf seinen bis dahin härtesten Konkurrenten an, genauer: auf den Besten unter allen, die vor Charles eintreffen. Nennen wir ihn Edward. Wohlgemerkt: Wer das ist, wissen wir erst, wenn die Reihenfolge der Kandidaten festliegt!

Edward ist eine tragische Figur: Ist er unter den ersten s Kandidaten, wird er zwar verschmäht, setzt aber die Maßstäbe so hoch, dass erst Charles die Prüfung wieder besteht. Das geschieht in s von $j-1$ Fällen. Kommt Edward später, wird er selbst oder ein Dritter erwählt, und der Traumprinz bleibt unbekannt.

Für Charles aber ist jede Position in der Reihenfolge der n Kandidaten gleich wahrscheinlich, also ist die Wahrscheinlichkeit P_n, dass er erwählt wird, gleich der Wahrscheinlichkeit $1/n$ dafür, dass er an j-ter Stelle kommt, mal der Wahrscheinlichkeit $s/(j-1)$ dafür, dass der jeweilige Edward sich für ihn opfert, summiert über alle j von $s+1$ bis n:

$$P_n = \frac{1}{n} \sum_{j=s+1}^{n} \frac{s}{j-1} = \frac{s}{n} \sum_{j=s}^{n-1} \frac{1}{j}$$

Dieser Ausdruck wird maximal, wenn man s so wählt, dass die Summe gerade noch größer als 1 oder gleich 1 ist. Für große n strebt das Verhältnis s/n gegen $1/e$.

Im kontinuierlichen Fall treffen *n* Kandidaten unabhängig voneinander zwischen den Zeiten 0 und 1 ein, ohne dass eine Ankunftszeit bevorzugt wäre. Die Prinzessin beendet ihre Erkundungsphase nicht nach s Kandidaten, sondern nach einer gewissen Zeit x. Welches ist der optimale Wert für x?

Diesmal bezeichnen wir mit Edward den besten unter den unglücklichen Kandidaten, die früh, das heißt bis zur Zeit x eintreffen. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass genau k Kandidaten besser sind als Edward (und damit definitionsgemäß spät, das heißt nach der Zeit x, eintreffen), ist gleich der Wahrscheinlichkeit x dafür, dass Edward früh kommt, mal der Wahrscheinlichkeit $(1-x)^k$ dafür, dass die k Besten spät kommen. Günstig ist nur der Fall, dass Charles als Erster unter diesen k eintrifft, was mit Wahrscheinlichkeit $1/k$ geschieht. Also ist die Wahrscheinlichkeit für den günstigen Ausgang der Geschichte

$$P_n(x) = x \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k}(1-x)^k + \frac{1}{n}(1-x)^n .$$

(Der letzte Term bezieht sich auf den Fall, dass alle Kandidaten spät eintreffen.) Lässt man nun n gegen unendlich streben, so geht der letzte Term gegen 0 und die Summe gegen $-\log x$ (Taylorentwicklung). Also strebt die Erfolgswahrscheinlichkeit $P_n(x)$ gegen $-x \log x$; diese Funktion hat ihr Maximum bei $1/e$. Man kann zeigen, dass $P_n(x)$ für alle n größer ist als $-x \log x$. Das Traumpaar hat also für $x = 1/e$ in jedem Fall eine bessere Chance als $1/e$, sich zu finden, auch wenn n unbestimmt ist!

Wenn die Kandidaten nicht gleichverteilt über die Zeit, sondern zum Beispiel bevorzugt kurz nach Erscheinen der Annonce eintreffen, bleibt die obige Analyse gültig. Wir müssen uns nur eine Uhr denken, die durch unregelmäßigen Gang diese Ungleichmäßigkeiten genau kompensiert. Sie tickt also zunächst schneller und dann wieder langsamer, sodass die Wahrscheinlichkeit für einen Kandidaten, zwischen zwei aufeinander folgenden Ticks einzutreffen, stets dieselbe ist. Das Ende der Erkundungsphase ist dann, wenn diese Uhr die Zeit x anzeigt.

▷ also eine doppelte Rolle; daher der Name 1/*e*-Gesetz. Sie haben sogar über 61 Prozent Wahrscheinlichkeit, einen der zwei besten Preise zu erzielen.

Wohlgemerkt: Diese Strategie gilt für Anspruchsvolle, die bereit sind, in Kauf zu nehmen, dass es in der geplanten Zeit nicht zum Verkauf kommt. Für andere Ziele sieht die optimale Strategie im Allgemeinen anders aus.

Und was tun, wenn es nun doch ein Angebot vor dem Stichtag gibt, das Ihnen so vorteilhaft erscheint, dass Sie auf jeden Fall annehmen möchten?

Tun Sie es. Selbst die besten Strategien werden zweitrangig, wenn Zusatzinformationen die Hypothesen, die ihnen zu Grunde liegen, verschieben. Zögern Sie also nicht, anzunehmen, wenn Sie das Glück haben, dass Ihnen die richtige Entscheidung offensichtlich erscheint. Meist ist die Entscheidung im täglichen Leben aber nicht so einfach, und dann verdient dieses Modell seine Beachtung.

Selbst professionelle Käufer/Verkäufer kennen dieses Modell kaum. Warum? Weil die Hypothesen in der Praxis meist nicht gelten? Vielleicht. Ein wichtiger Grund mag aber sein, dass es oft lange dauert, bis in mathematischen Zeitschriften publizierte Ergebnisse in vereinfachter Form zugänglich werden.

Wende ich die 1/*e*-Methode selbst an? Im beruflichen Umfeld habe ich keine Gelegenheit hierzu. Privat schon einige Male. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



F. Thomas Bruss ist Professor für Mathematik und Präsident des Mathematischen Departements der Freien Universität Brüssel (Université Libre de Bruxelles).

A note on bounds for the odds-theorem of optimal stopping. Von F. Thomas Bruss in: Annals of Probability, Bd. 31, S. 1859 (2003)

A unified approach to a class of best choice problems with an unknown number of options. Von F. Thomas Bruss in: Annals of Probability, Bd. 12, S. 882 (1984)

Dynamic programming and decision theory. Von D. V. Lindley in: Applied Statistics, Bd. 10, S. 35 (1961)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Stille Erdbeben

Überraschung für Seismologen: Nicht immer muss es rumpeln, wenn sich die Spannung an einer Bruchzone plötzlich entlädt. Lautlose Verwerfungen bergen neue Gefahren, aber auch Chancen

USGS / JAPAN MARINE AND TECHNOLOGY CENTER, UNIVERSITY OF HAWAII AND MONTEREY BAY AQUARIUM RESEARCH INSTITUTE

WEITERE THEMEN IM JUNI

Die Ursache der Eifersucht

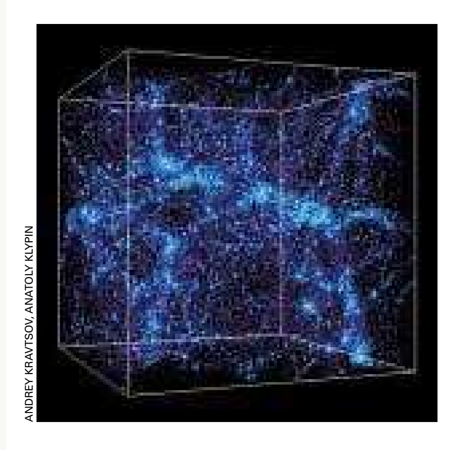
Auch wenn Evolutionspsychologen das behaupten: Die Eifersucht von Frauen und Männern unterscheidet sich im Kern nicht. Beiden Geschlechtern geht es vor allem um die Liebe

Der Venus-Durchgang

Wenn am 8. Juni unser innerer Nachbarplanet vor der Sonnenscheibe vorüberzieht, erinnert dieses seltene Ereignis die Wissenschaftler an eine der aufregendsten Geschichten der astronomischen Forschung

Die Krux mit dem Sex

Fast jede Spezies – unsere eigene eingeschlossen – praktiziert Sex und möchte ihn keinesfalls missen. Dabei gibt es viel effizientere Wege, sich fortzupflanzen. Werden wir je herausfinden, wofür Sex eigentlich da ist?



ANDREY KRAVTSOV, ANATOLY KLYPIN

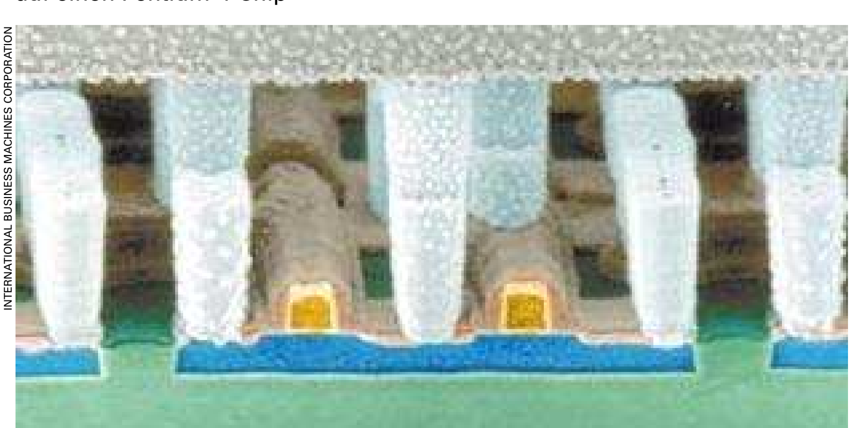
SERIE: KOSMOLOGIE, TEIL II

Galaktische Wände und Blasen

Die neuesten Karten des Universums enthalten Hunderttausende von Galaxien. Deren räumliche Verteilung zeigt riesige Strukturen, die ihren Ursprung in winzigen Fluktuationen der Materiedichte unmittelbar nach dem Urknall haben

Die ersten Nanochips

sind längst auf dem Markt. Nur Nanotechnik bringt 42 Millionen Transistoren auf einen Pentium-4-Chip



INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION